

30-0204/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

"Baukostendämpfung bei Geschößtreppen"

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

A B S C H L U S S B E R I C H T

zum Forschungsvorhaben

Bericht erstattet von
o.Prof. Dr.-Ing.E.h. Dr.-Ing. K. Kordina
Dipl.-Ing. H.-H. Osteroth

Braunschweig im September 1987

Das Forschungsvorhaben wurde im Auftrage des Bundesministeriums
für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn - Bad Godesberg
durchgeführt. (Az.: B15 - 80 01 85 - 3)

Das Forschungsvorhaben

"Baukostendämpfung bei Geschoßtreppen"

über dessen Durchführung und Ergebnisse im folgenden berichtet wird, wurde dankenswerterweise vom Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau gefördert.

Den Gutachtern des Forschungsvorhabens

Prof. Dr.-Ing. H. Duddeck, Braunschweig und

Dr.-Ing. K. Stiglat, Karlsruhe

sei an dieser Stelle für die Unterstützung der Arbeit gedankt.

Danksagen möchten wir auch den Mitarbeitern des Instituts, die zum Gelingen der Versuche beigetragen haben, und von denen Herr Dipl.-Ing. H. Klinkert hier stellvertretend genannt sei.

Inhaltsverzeichnis

Literatur

1	Einleitung	1
1.1	Erläuterung der Problemstellung	1
1.2	Überblick zur vorliegenden Arbeit	2
2	Übersicht zum bisherigen Kenntnisstand	3
2.1	Konstruktive Ausbildung gerader, gegenläufiger Plattentreppen mit Podesten	3
2.2	Bestehende Modellvorstellungen und Berechnungsverfahren für Treppen	6
2.2.1	Berechnung ohne Berücksichtigung der Faltwerkwirkung	6
2.2.2	Berechnung mit Berücksichtigung der Faltwerkwirkung	14
3	Planung der Versuche zum Tragverhalten gerader, gegenläufiger Podesttreppen	21
3.1	Ausbildung und Abmessungen der Versuchskörper	21
3.2	Beschreibung der Versuchskörper	24
3.2.1	Herstellung und Bewehrung	24
3.2.2	Baustoffe und Materialeigenschaften	28
3.3	Beschreibung des Versuchsstandes	30
3.3.1	Allgemeines	30
3.3.2	Belastungseinrichtung	33
3.3.3	Auflagerung der Versuchskörper	34
3.4	Messungen bei der Versuchsdurchführung	35
3.5	Versuchsablauf	38
4	Darstellung der Versuchsergebnisse	41
4.1	Allgemeines	41
4.2	Durchbiegungen	41
4.3	Betonstauchungen	46
4.4	Stahldehnungen	47
4.5	Auflagerkräfte	49
4.5.1	Vertikale Auflagerkräfte	49
4.5.2	Horizontale Auflagerkräfte	51
4.6	Rißentwicklung und Rißbreiten	52
4.7	Versagenszustand der Versuchskörper	56
4.8	Zeitabhängiges Verhalten der Versuchskörper	59
5	Bewertung der Versuchsergebnisse	63
5.1	Allgemeines	63
5.2	Formänderungsverhalten	63
5.3	Dehnungsmessungen	65
5.4	Vertikale und horizontale Auflagerkräfte	66
5.5	Rißverhalten	67
5.6	Traglasten der Versuchskörper	69
6	Rechnerische Untersuchung des Tragverhaltens gerader, gegenläufiger Podesttreppen	71
6.1	Allgemeines	71
6.2	Übersicht zum Berechnungsprogramm	72
6.3	Ergebnisse der rechnerischen Untersuchungen	74
6.3.1	Formänderungsverhalten	74
6.3.2	Plattentragwirkung	75
6.3.3	Hauptspannungen in den Plattenmittelebenen	82
6.3.4	Auflagerkräfte	86

7 Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen und den Berechnungen	89
7.1 Allgemeines	89
7.2 Vergleich der Durchbiegungen	89
7.3 Vergleich des Plattentragverhaltens	91
7.4 Vergleich der Scheibenbeanspruchung	92
7.5 Vergleich der Bruchlasten	89
8 Vorschlag für ein vorläufiges Näherungsverfahren	97
8.1 Allgemeines	97
8.2 Bestimmung der Plattenbeanspruchung	98
8.3 Erfassung der Scheibenbeanspruchung	100
8.4 Berechnung der Auflagerkräfte	101
8.4.1 vertikale Auflagerkräfte	101
8.4.2 horizontale Auflagerkräfte	101
9 Zusammenfassung	103

Literaturverzeichnis

- /1/ Born, J.
Berechnung einer einläufigen Treppe als Faltwerk.
Bauwelt 51, Heft 22, 1960, S. 631
- /2/ Born, J.
Faltwerke (Ihre Theorie und Berechnung).
Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1954
- /3/ Born, J.
Faltwerke. Betonkalender 1965, Bd. II, S. 385-455,
Verlag W. Ernst + Sohn, Berlin, 1965
- /4/ Bruckner, H.
Elastische Platten. Vieweg & Sohn Verlagsgesell-
schaft mbH, Braunschweig, 1977
- /5/ Craemer, H.
Allgemeine Theorie der Faltwerke,
Beton und Eisen, Heft 15, 1930, S. 276-281
- /6/ Czerny, F.
Tafeln für vierseitig und dreiseitig gelagerte
Rechteckplatten. Betonkalender 1984, Bd. I, S. 349-446,
Verlag W. Ernst + Sohn, Berlin, 1984
- /7/ Dörr, K., Mehlhorn, G., Stauder, W., Uhlisch, D.
Berechnung von Stahlbetonscheiben im Zustand II bei
Annahme eines wirklichkeitsnahen Werkstoffverhaltens,
Heft 238 der Schriftenreihe des DAfStb., Berlin, 1974
- /8/ Ehlers, G.
Ein neues Konstruktionsprinzip.
Der Bauingenieur 11, 2, 1930, S. 125-132.
- /9/ Ehlers, G.
Die Spannungsermittlung in Flächentragwerken.
Beton und Eisen, Heft 15, 1930, S. 281-286 und Heft 16,
1930, S. 291-296

- /10/ Ertürk, J.N.
Zwei-, drei- und vierseitig gestützte Rechteckplatten.
Verlag Wilhelm Ernst + Sohn, Berlin, München, 1965
- /11/ Freihart, G.
Die Berechnung der trägerlosen, geraden Podesttreppe.
Beton- und Stahlbetonbau 50, 12, 1955, S. 318-319
- /12/ Fuchs, N.
Konstruktion von zweiläufigen Stahlbetonpodesttreppen
mit gemeinsamen Bruchkanten. Deutsches Architektenblatt,
Ausg. Baden-Württemberg 10, 9, 1977, S. 857-858
- /13/ Fuchssteiner, W.
Treppen. Betonkalender 1965, Bd. II, S. 51-84,
Verlag W. Ernst + Sohn, Berlin, 1965
- /14/ Funke, L.
Die elastische Einspannung gerader Treppenläufe in
trägerlosen Podestplatten.
Der Bauingenieur 32, 3, 1957, S. 90-92
- /15/ Guerrin, A., Lavour, R.C.
Traité de Bétonarmé.
Tome IV, 4. Aufl., Dunod, Paris, 1971
- /16/ Johannsen, K.W.
Brudlinieteorier. Polyteknisk Forening, 1958
- /17/ Koncz, T.
Handbuch der Fertigteil-Bauweise. 2. Auflage, Bd. III,
Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin, 1967
- /18/ Kordina, K., Fröning, H.
Überprüfung des Tragverhaltens von deckengleichen
Unterzügen. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben
BI5-800173-46 im Auftrag des Bundesministers für
Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, durchgeführt am
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der
Technischen Universität Braunschweig, 1980

- /19/ Kordina, K., Wiedemann, G.
Untersuchungen über die Bewehrungsführung in geknickten Treppenlaufplatten.
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Landes- und Stadtentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf (Az: VB 1/72.02-61/75), durchgeführt am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1976
- /20/ Kordina, K., Schaaff, E., Westphal, T.
Empfehlungen für die Bewehrungsführung in Rahmenecken und -knoten,
Heft 373 der Schriftenreihe des DAfStb., Berlin, 1986
- /21/ Koseoglu, S.
Treppen. Betonkalender 1980, Bd. II, S. 901-1034,
Verlag W. Ernst + Sohn, Berlin, 1980
- /22/ Lem, D.Y.
Treppen aus Eisenbeton.
Beton und Eisen 12, 1930, S. 392-396
- /23/ Meyer-Bohe, W.
Elemente des Bauens, Treppen. 2. Aufl., Verlagsanstalt Alexander Koch GmbH, Leinfelden-Echterdingen, 1983
- /24/ Mielke, F.
Geschichte der deutschen Treppen. München, 1966
- /25/ Quast, U.
Zur Mitwirkung des Betons in der Zugzone.
Beton- und Stahlbetonbau 76, 10, 1981, S. 247-250
- /26/ Rosmann, R.
Plattentreppen.
Deutsche Bauzeitung 30, 9, 1982, S. 1259-1274
- /27/ Schäfer, H., Schneider, G., Schäfer, H.G.
Experimentelle Ermittlung der Steifigkeiten von Stahlbetonplatten,
Heft 345 der Schriftenreihe des DAfStb., Berlin, 1983

- /28/ Schuster, F.
Treppen aus Stein, Holz und Metall.
Julius Hoffmann Verlag, Stuttgart, 1960
- /29/ Stiglat, K., Wippel, H.
Platten. 2. Auflage, Verlag Wilhelm Ernst + Sohn,
Berlin, München, Düsseldorf, 1973
- /30/ Stiglat, K.
Einfluß von biege- und torsionssteifen Unterstützungen
bei Platten. Die Bautechnik, 10, 1970, S. 355-359 und
11, 1970, S. 381-386
- /31/ Suenson, E.
Trägerlose Eisenbetontreppen.
Beton und Eisen 19, 1937, S. 308-368
- /32/ Wommelsdorf, O.
Stahlbetonbau, Bemessung und Konstruktion,
Teil 2, 1. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1973

Normen

- /33/ DIN 1045
Beton- und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung,
Ausgabe 1978
- /34/ DIN 1048
Prüfverfahren für Beton, Teil 1-4
- /35/ DIN 1055
Lastannahmen für Bauten - Verkehrslasten -, Teil 3,
Ausgabe Juni 1971

1 Einleitung

1.1 Erläuterung der Problemstellung

Treppen dienen in Gebäuden oder baulichen Anlagen der Überwindung von Höhenunterschieden durch Personen. Sie zählen daher seit jeher sowohl im Wohnungs- wie auch im Industriebau zu den wichtigen und häufig erstellten Bauteilen. Insbesondere die mit der Bebauungsdichte steigenden Geschöszahlen und die zunehmende Industrialisierung des Bauens haben dazu geführt, daß Treppen wegen der einfachen Schalung und Bewehrungsführung heute sehr oft als gerade, gegenläufige Plattentreppen aus Läufen und Podesten erstellt werden. Auch die sparsame Raumausnutzung dieser Konstruktionen kann als wichtiger Vorteil angesehen werden.

Die vorliegende Arbeit soll zur wirklichkeitsnahen Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens und zur Entwicklung praxisnaher und einfach anzuwendender Konstruktionskonzepte für solche Treppen beitragen. Während nämlich für die architektonischen Belange der Gestaltung, der Anordnung im Gebäude und der Wahl des Steigungsverhältnisses von Treppen langjährig überlieferte und bewährte Angaben sowie Formeln vorliegen, die unter Berücksichtigung der menschlichen Schrittlänge, des geringsten Kraftaufwandes beim Treppensteigen oder der ausreichenden Sicherheit beim Absteigen abgeleitet wurden und somit neben guter optischer Gestaltung auch eine sichere und bequeme Begehbarkeit der Treppe gewährleisten, fehlen bis heute zur Anwendung in der Praxis geeignete Bemessungsregeln, die das Tragverhalten ausreichend wirklichkeitsnah beschreiben /10,19,20,24/. Der Grund dafür ist das - trotz der einfach erscheinenden äußeren Form - komplizierte und rechnerisch schwierig zu erfassende, aus Treppenläufen und Podesten gebildete räumliche Faltwerkssystem.

Mögliche Lösungsansätze zur Beschreibung des Tragverhaltens sollen hier zunächst auf experimentellem Weg mit den Ergebnissen aus zwei Belastungsversuchen in naturnahem Maßstab und

aus ergänzend dazu durchgeführten Berechnungen des räumlichen Systems nach der FE-Methode aufgezeigt werden.

1.2 Überblick zur vorliegenden Arbeit

Der vorliegende Abschlußbericht beschreibt die Untersuchungen und Ergebnisse einer Forschungsarbeit, deren wichtigste Zielsetzung in der genauen Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens zu sehen ist. Dazu wurde die Aufteilung des Berichts an die zu dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungsabschnitte angelehnt. Im folgenden Kapitel wird zunächst eine umfassende Übersicht zu den bisher bestehenden Tragmodellen und Berechnungsverfahren gegeben.

Die anschließenden Kapitel befassen sich mit den als Hauptteil der Arbeit anzusehenden experimentellen Untersuchungen. Die Versuchsplanung wird eingehend erläutert. Die zum Versuchsprogramm, zum Versuchsstand und der Ausbildung der Versuchskörper getroffenen Festlegungen und Randbedingungen werden ebenso begründet und beschrieben wie das umfangreiche Meßprogramm und der Versuchsablauf. In den nächsten Kapiteln folgt dann eine ausführliche Behandlung der Versuchsergebnisse, die zunächst nur beschrieben und danach im Hinblick auf die zur Faltwerkwirkung abzuleitenden Hinweise bewertet und diskutiert werden.

Dem nachfolgenden Abschnitt, in dem die rechnerischen Untersuchungen dargelegt werden, folgt ein ausführlicher Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der Berechnungen. Daraus kann ein einfaches Näherungsverfahren abgeleitet werden. Das letzte Kapitel beinhaltet die Zusammenfassung und liefert Hinweise auf verbliebene Fragestellungen.

Der zur besseren Übersichtlichkeit gesondert gebundene Anhang enthält neben Skizzen zum Versuchsstand und Angaben zur Versuchsdurchführung eine umfangreiche graphische Aufbereitung aller Versuchsergebnisse sowie die Angabe der wichtigsten Meßergebnisse in tabellarischer Form.

2 Übersicht zum bisherigen Kenntnisstand

2.1 Konstruktive Ausbildung gerader, gegenläufiger Platten-treppen mit Podesten

Geschoßtreppen grenzen häufig an Mauerwerkswände, oder sie werden in eigens dafür vorgesehenen Stahlbetonschächten angeordnet, die als Treppenhauskerne in Hochbauten auch zur Aussteifung gegenüber Horizontalkräften dienen. Für Industriebauten - z.B. Silos, Faulbehälter und Kraftwerke - ist oftmals die Errichtung von Treppentürmen erforderlich, die allein standsicher sein müssen und in der Regel in Stahlbeton mit dem Gleitbauverfahren erstellt werden. Da die Herstellung schräger Mauerwerksschlitze und der Einbau der Anschlußbewehrung in ständig wechselnden Höhen besonders beim Gleitbauverfahren aber auch in Mauerwerks- und Ortbetonwänden schwierig ist, werden die schrägen Laufplatten einfachheitshalber meistens durch eine Fuge von den seitlich angrenzenden Wänden getrennt. Die Auflagerung des Treppensystems erfolgt dann ausschließlich über die Podeste, die wie in Bild 1 an drei Seiten oder nur mit den schmalen Stirnseiten aufgelagert werden.

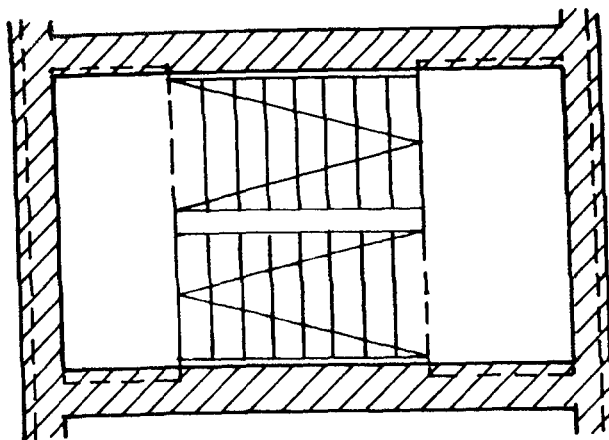


Bild 1: Grundriß der geraden, gegenläufigen Plattentreppe mit Podesten

Unabhängig von der Podestauflagerung sind die Läufe immer als einachsig zwischen den Podesten gespannte Platten anzusehen. Aus der heute meist unterstellten Annahme, daß die Last bei Treppen ausschließlich durch Plattentragwirkung abgeleitet wird, folgt, daß an den Knicklinien zwischen Podest und Lauf eine Verstärkung der Podestplatte notwendig ist, um hier die Belastung aus den Läufen aufnehmen zu können. In Bild 2 sind unter b) bis d) gebräuchliche Lösungen aufgezeigt.

Während bei alten Treppenkonstruktionen aus Mauerwerk - wie z.B. nach Bild 2 a) - Balken zur Aufnahme des Gewölbeschubs sinnvoll und notwendig waren, versuchte man, bei Verwendung der Stahlbetonbauweise sehr bald ohne diese Podestbalken auszukommen, da in der Untersicht hervorragende Balken einerseits die Durchgangshöhe einschränken und andererseits unschön und auch bezüglich der Herstellung unwirtschaftlich sind. Die in Bild 2 unter d) skizzierte Lösung, bei der in einer verstärkten Podestplatte ein versteckter Unterzug angeordnet ist, stellt daher heute die Standardlösung dar und ist als Weiterentwicklung von b) und c) anzusehen. Nur bei Treppen mit geringen Abmessungen kann ganz auf die Ausbildung eines Podestbalkens an der Knicklinie verzichtet werden, da die Podestplatte als zwei- oder dreiseitig gelagerte Platte mit Randlasten allein in der Lage ist, die Belastung aus den Läufen abzutragen.

Im Hinblick auf die Bewehrungsführung dieser nur für die Plattentragwirkung konzipierten Treppen ist vor allem an den einspringenden Ecken, im Knickbereich zwischen Podest- und Laufplatte besondere Sorgfalt erforderlich. Die in /19/ und /20/ hierzu mitgeteilten Ergebnisse aus Forschungsarbeiten zeigen, daß die im Versuch erreichte Bruchlast geknickter Treppenläufe mit positiver Momentenbeanspruchung oftmals erheblich unter den rechnerischen Werten liegt. Gute Versuchsergebnisse, die sogar geringfügig über den rechnerischen Werten lagen, wurden lediglich mit einer Bewehrungsführung gemäß Bild 3 erzielt.

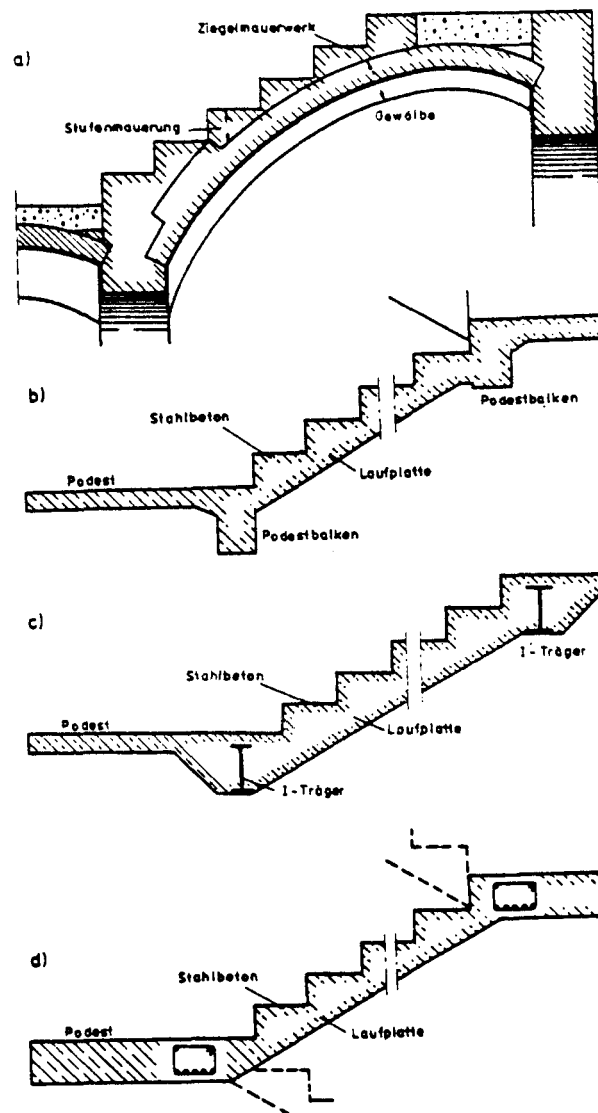


Bild 2: Podestträgerausbildung bei geraden, gegenläufigen Plattentreppen mit Podesten

Die Anforderungen an eine konstruktiv einwandfreie Bewehrungsführung gerader Podesttreppen in den übrigen Bauteilbereichen bereiten gegenüber den Anforderungen, die an die Bewehrungsführung anderer Stahlbetonbauteile (Balken, Platten) gestellt werden, keine erhöhten Schwierigkeiten. Ausführliche Angaben zur Bewehrungsführung sind unter anderem in /13,21,26,32/ zu finden.

Berücksichtigt man bei Treppen neben der Plattentragwirkung auch noch die aus der abgewinkelten Anordnung der Läufe und Podeste entstehende Membran- und Scheibenwirkung, bei der die

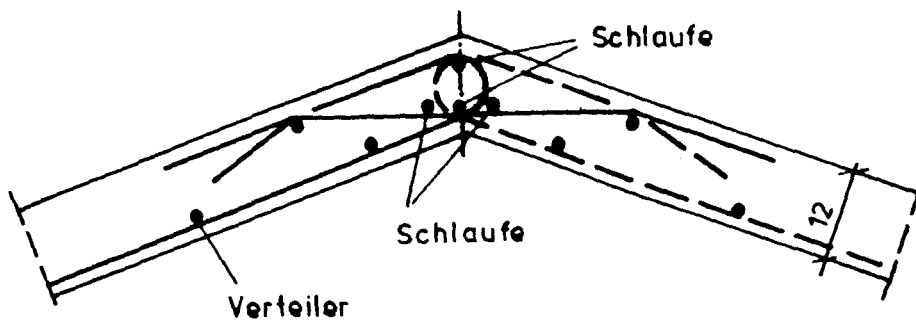


Bild 3: Günstige Bewehrungsführung im Knickbereich von Platten nach /19/

Platten zusätzlich durch Scheibenspannungen beansprucht werden, die parallel zu den Plattenmittelebenen verlaufen, so sind Konstruktionen ohne Verstärkungen an den Knicklinien möglich, weil bereits die Stützung infolge der Scheibentragwirkung zu einer deutlich verminderten Durchbiegung entlang der Knicklinien führt. Die Ausnutzung der Faltwerkwirkung sollte daher möglichst immer angestrebt werden, um trotz geringer Plattendicken auf Podestbalken verzichten zu können und somit auch noch eine Vereinfachung der Bewehrungsführung zu erreichen. Die vorliegende Forschungsarbeit soll hierzu beitragen.

2.2 Bestehende Modellvorstellungen und Berechnungsverfahren für Treppen

2.2.1 Berechnung ohne Berücksichtigung der Faltwerkwirkung

Auch wenn die Auflagerung von Treppen aus den im vorigen Abschnitt erläuterten Gründen nur über die Podeste erfolgt, so verbleiben doch noch zahlreiche Möglichkeiten für die Ausbildung unterschiedlicher statischer Systeme. Eine Übersicht zu den wichtigsten Systemvarianten und den gebräuchlichsten

Rechenverfahren, bei denen ausschließlich die Plattentragwirkung berücksichtigt wird, geben z.B. Fuchssteiner /13/, Rosmann /26/ und Wommelsdorff /32/.

Ein besonders einfaches System ist die an ihren Enden aufgelagerte, gerade Treppe mit einem oder zwei Podesten gemäß Bild 4. Diese Treppe stellt eine geknickte Platte dar. Ihre Schnittgrößen werden anhand der Grundrißprojektion mit den auf den Grundriß bezogenen Lasten berechnet. Die auf die Breite des Treppenauges entfallenden Lastanteile werden bei zweiläufigen Treppen, jeweils den beiden Treppenhälften zugewiesen.

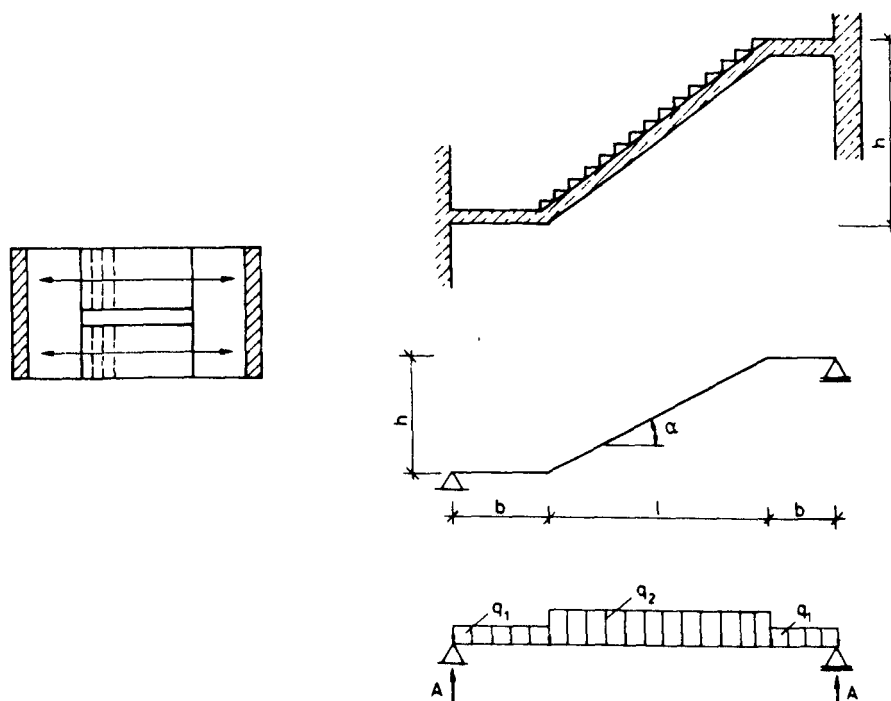


Bild 4: An den Enden gelagerte Treppe, Grundriß, Schnitt, statisches System

Wegen der großen Stützweite erfordert die Lösung nach Bild 4 große Plattendicken mit erheblichem Materialverbrauch und aufwendiger Bewehrungsführung. Die Anordnung von Podestbalken in den Knicklinien zwischen Podest und Lauf gemäß Bild 5 würde sich hier zwar günstig auswirken. Vorwiegend begrenzte Durchgangshöhen aber auch architektonische Gründe verhindern jedoch oftmals diese Lösung.

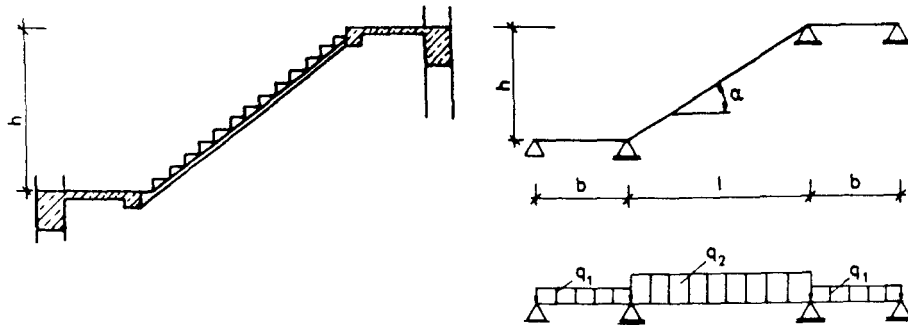


Bild 5: An den Enden gelagerte Treppe mit zusätzlichen Podestbalken in den Knicklinien

Werden die Podeste wie in Bild 1 nicht nur an den Enden, sondern auch an den Seiten aufgelagert, so kann die Berechnung für die Läufe und Podeste nicht mehr in einem Schritt durchgeführt werden. Während die Laufplatten weiterhin wie einachsig gespannte Platten zu berechnen sind, die auf der sicheren Seite liegend für die Bestimmung der Feldmomente als gelenkig gelagert und für die Einspannung in die Podestebene als zweiseitig eingespannt angenommen werden können, sind die Schnittgrößen für die Podeste jetzt immer nach der Plattentheorie zu bestimmen, da bereits bei nur zweiseitig gelenkiger Lagerung der Podeste eine Abtragung der Randlasten nur über die Ausnutzung der Plattentragwirkung sinnvoll und in den meisten Fällen auch nicht anders möglich ist.

In diesem Zusammenhang sei auf Untersuchungen von Kordina/Fröning /18/ und Stiglat /30/ zur Wirksamkeit von sogenannten "versteckten oder deckengleichen Unterzügen" entsprechend Bild 2 d) hingewiesen. Sie zeigen, daß die Anwendung der üblichen Berechnungsverfahren für deckengleiche Unterzüge - Vernachlässigung der Durchbiegung des deckengleichen Unterzugs bei der Berechnung der Platte und Anwendung der Balkentheorie bei der Berechnung des deckengleichen Unterzugs - das wirkliche Tragverhalten falsch einschätzen. Trotz starker Rißbildung der Platte im Bruchzustand reicht die infolge der konzentrierten Bewehrung im deckengleichen Unterzug verursachte Steifigkeitserhöhung dieses

deckengleichen Unterzuges gegenüber der Platte nicht aus, um das üblicherweise vorausgesetzte Tragverhalten zu erfüllen. Die Lösung nach Bild 2 d) kann daher aus statischer Sicht nicht empfohlen werden.

Konsequenterweise wird deshalb in der Praxis heute meistens auf Podestbalken verzichtet, so daß sich das in Bild 6 dargestellte System ergibt.

Podeste übernehmen
Lasten aus Treppenlauf

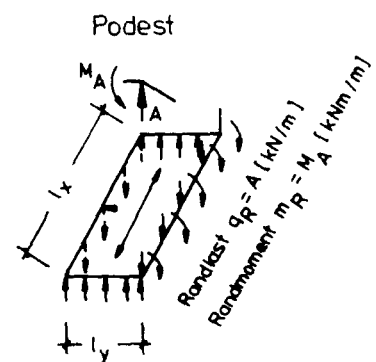
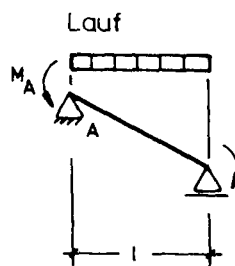
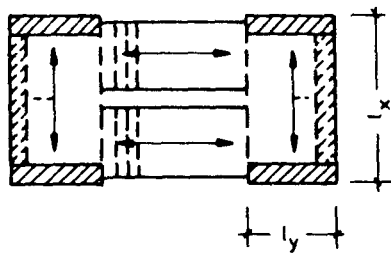


Bild 6: Treppensystem ohne Podestbalken, Podestplatte mit Randlast und Randmoment

Die Berechnung der Laufplatte ändert sich gegenüber dem oben besprochenen System nicht. Sie erfolgt - wie in Bild 6 angedeutet - als zweiseitig gelagerte Platte. Die Podestplatte wird zusätzlich durch eine Randlast q_R und ein Randmoment m_R aus der Laufplatte belastet. Tafeln zur Schnittgrößenermittlung solcher zwei- bzw. dreiseitig gelagerter Platten unter Randlinienlasten und Randmomentenangriff sind unter anderem in /10/ und /29/ enthalten. Die Berechnung dieser Systeme bereitet also keine Schwierigkeiten. Sie führt wie erwähnt jedoch bereits bei üblichen Abmessungen von Wohnhaustreppen zu erheblichen Schnittgrößen in der Podestplatte und damit zu großer Dicke und hohem Bewehrungsstahlbedarf.

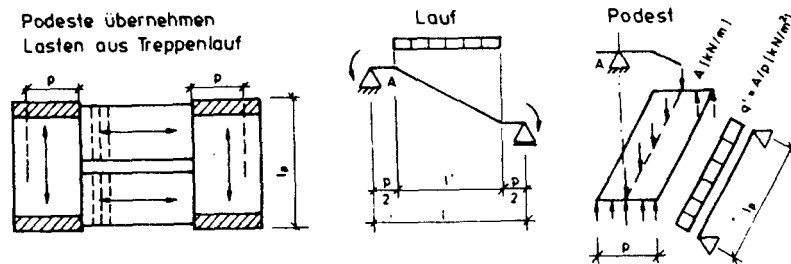


Bild 7: Treppensystem ohne Podestbalken, Auflagerung der Läufe in Podestmitte

In statischen Berechnungen wird auch die in Bild 7 ange-deutete Systemvorstellung /32/ recht häufig angewendet. Wie bei dem Verfahren nach Bild 6 übernehmen die Podeste die Lasten aus den Treppenläufen. Die Läufe sind einachsig gespannt; ihre Auflagerung wird jedoch nicht in der Knicklinie angenommen, sondern versetzt etwa im Bereich der Podestplattenmitte. Diese Annahme ist willkürlich und kaum durch ein mechanisches Modell zu begründen. Es ist darüberhinaus leicht einzusehen, daß auch bei Anwendung dieses Modells keine besonders wirtschaftlichen Bewehrungsführungen für die Podestplatten zu erwarten sind.

In /21/ wird ein Berechnungsverfahren für Treppen angegeben, das dort zwar unter der Überschrift "Berechnungsmethoden der Faltwerksysteme" erläutert wird, bei dem die Berechtigung zu dieser Bezeichnung jedoch nicht besteht, weil die Scheibentragswirkung nicht berücksichtigt wird. Der Rechengang entspricht vielmehr der zu Bild 6 dargelegten Konzeption. Das Verfahren wird deshalb in diesem Abschnitt aufgeführt. Ein möglicher Vorteil ist in der genaueren Erfassung der Spannverhältnisse zu sehen, die unter Anwendung des bekannten Kraftgrößenverfahrens bestimmt werden. Für zwei- oder dreiseitig gelenkig gelagerte Podestplatten werden Tabellenwerte angegeben, mit denen die Ermittlung der Schnittgrößen und Formänderungen für das gewählte Hauptsystem ermöglicht wird. Dieses hierfür notwendige Tabellenwerk könnte allerdings auch

aus /4/, /10/ oder /29/ entnommen werden. Aus den Arbeitsgrößen kann dann das unbekannte Plattenbiegemoment an den Knicklinien unmittelbar errechnet werden.

Bei Anwendung dieses Verfahrens ist insbesondere in den Fällen Vorsicht geboten, wenn Auflagerlinien des betrachteten Treppensystems horizontal unverschieblich gehalten sind, etwa durch Einbindung in Deckenplatten oder Stahlbetonwände. Die vermeintlich genauere Berechnung sollte in diesen Fällen nicht darüber hinwegtäuschen, daß gerade die infolge der Faltwerkwirkung entstehende Stützung aus der Scheibenbeanspruchung nicht berücksichtigt wird. Die Stützmomente an den Knicklinien würden deutlich unterschätzt oder sogar als positive Biegemomente errechnet werden, die Zugspannungen an der Plattenunterseite hervorrufen. Sie müßten an der Oberseite wieder durch konstruktiv eingelegte Bewehrung abgedeckt werden, was den Sinn der vorab durchgeführten genaueren Berechnung nach dem Kraftgrößenverfahren zumindest fraglich erscheinen läßt. Auch die gemäß Bild 8 zur Berücksichtigung der Faltwerkwirkung in /21/ empfohlene dreieckförmige Verteilung der Linienlasten aus den Läufen an den Podestkanten kann nur als sehr grobe Näherung angesehen werden. Der eigentliche Mangel dieses Verfahrens - die Vernachlässigung der Stützung entlang der Knicklinie - wird durch eine Korrektur der Lastverteilung nicht aufgehoben.

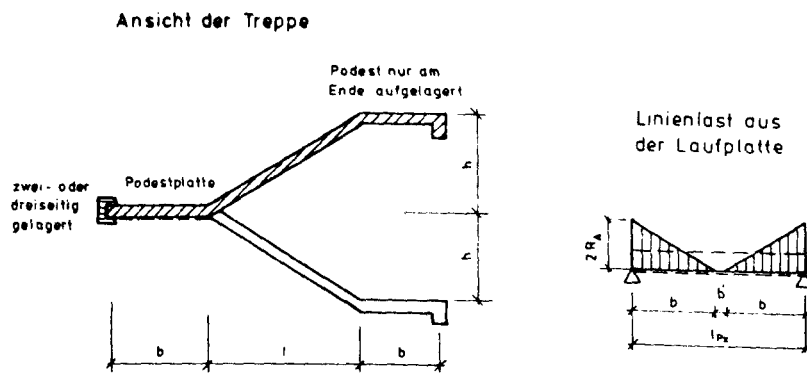


Bild 8: Treppe mit unterschiedlicher Podestauflagerung und Vorschlag zur Verteilung der Linienlast aus der Laufplatte zur Berücksichtigung der Faltwerkwirkung nach /21/

Neben der Ableitung geschlossener Systemvorstellungen und Berechnungsvorschläge werden in einigen Arbeiten auch Einzelfragen und Sonderprobleme zur Wechselwirkung zwischen den Lauf- und Podestplatten solcher Treppen untersucht, deren Tragverhalten ebenfalls ausschließlich durch die Plattenbeanspruchung bestimmt wird. Dabei steht die wirklichkeitsnähere Abschätzung der Laufplatteneinspannung für eine zutreffendere Bemessung der Läufe, die nicht von den Grenzwerten für volle Einspannung und gelenkige Lagerung ausgeht, im Vordergrund.

Von Freihart werden hierzu in /11/ zwei Vorschläge zur Berücksichtigung des Torsionswiderstandes gemacht. Bei dem ersten werden die Podeste und Läufe als in ihren Achsen zusammengefaßte Träger mit symmetrischer, torsionselastischer Einspannung betrachtet. Der zweite Vorschlag, der auch für breite, kurze Läufe geeignet ist, faßt diese nicht als Träger, sondern als elastisch in die Podeste eingespannte Platten auf. Hierdurch ist es möglich, den Verlauf der Momente über die Podestbreite anzugeben (Bild 9).

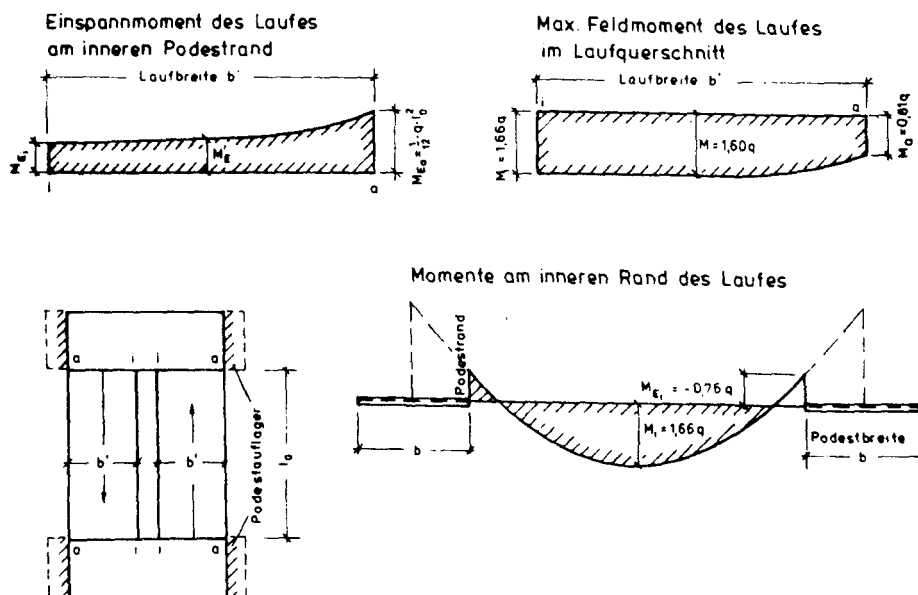


Bild 9: Momentenverlauf in den Läufen nach Freihart /11/

Funke berücksichtigt in /14/ sowohl die Drillsteifigkeit des Podestquerschnitts wie auch den Wölbwiderstand zur Bestimmung der elastischen Einspannung der Treppenläufe. Unter der Voraussetzung, daß die Querschnittsform des Podestes erhalten

bleibt, werden Lösungen für gegenläufige, trägerlose Podesttreppen mit zwei- und dreiseitig gelenkiger Lagerung angegeben.

Ergänzend zu den vorgestellten Verfahren sei hier noch auf die Möglichkeit hingewiesen, Treppen nach der Bruchlinientheorie zu berechnen. In Abschnitt 15.1.2 von DIN 1045 /33/ wird zwar gefordert, daß die Schnittgrößen statisch unbestimmter Systeme nach Verfahren zu berechnen sind, die auf der Elastizitätstheorie beruhen. Insbesondere zur wirklichkeitsnahen Erfassung des Bruchzustandes ist die Bruchlinientheorie jedoch geeignet und wird daher auch in vielen Ländern verwendet. Eine umfassende Darstellung dieser Theorie wird z.B. von Johannsen in /16/ gegeben.

Das Verfahren geht davon aus, daß längs gewisser Linien bei der Laststeigerung von Platten über den Gebrauchszustand hinaus klaffende Risse entstehen und die Bruchfigur aus dem Bruchliniennetz abgeleitet werden kann. Dabei wird ideal-elastoplastisches Material vorausgesetzt. Als Verformungen werden nur die Drehungen entlang der Knicklinien berücksichtigt unter Vernachlässigung der elastischen Verformungen vor dem Bruch. Die Bruchlinien werden auf ganzer Länge als plastifiziert unterstellt. Mögliche maßgebende Bruchlinien, deren zutreffende Bestimmung bei diesem Verfahren als wesentlicher Schritt anzusehen ist, wurden beispielhaft für einige gebräuchliche Treppensysteme in /15/ und /21/ angegeben. Auch hierbei wurde das Treppensystem ausschließlich als Platte betrachtet und die Scheibentragswirkung unberücksichtigt gelassen. Die Berücksichtigung der Stützung an den Knicklinien ist jedoch bei diesem Verfahren im Grundsatz durchaus vorstellbar und möglich. Auch wenn die Findung der maßgebenden Bruchlinien damit erschwert wird.

Die in /15/ für eine gerade, gegenläufige Treppe mit einem Podest durchgeführte Berechnung zeigt, daß die Ergebnisse nach der Bruchlinientheorie bereits ohne Berücksichtigung der Faltwerkwirkung gegenüber den vorab behandelten Berechnungsverfahren nach der Elastizitätstheorie eine günstigere Podestbewehrung ergeben und somit insgesamt Bewehrungseinsparungen erwarten lassen. Dies ist wohl auch damit zu erklä-

ren, daß der Einfluß der konzentrierten Linienlast am Po-
destrand weniger ausgeprägt ist. Zu berücksichtigen ist al-
lerdings, daß die Bruchlinientheorie keine Aussagen über das
Verhalten im Gebrauchszustand ermöglicht. Hierfür sind zu-
sätzliche Betrachtungen notwendig.

2.2.2 Berechnung mit Berücksichtigung der Faltwerkwirkung

Obwohl wesentliche Annahmen der analytischen Berechnung pris-
matischer Faltwerke auf Treppen nicht zutreffen - so sind
beispielsweise die Einzelscheiben nicht von geringer Höhe
gegenüber der Länge und damit der Spannungsverlauf nicht
linear-, erkannte man schon unmittelbar nachdem Ehlers /8/ im
Jahr 1930 erstmals die Ausnutzung der Faltwerkwirkung beim
Bau von Silozellen als neue Bauweise beschrieben hatte und
das Tragverhalten von Faltwerken auch in ersten analytischen
Betrachtungen /5, 9/ behandelt worden war, daß die Ausnutzung
der Faltwerkwirkung auch bei Plattentreppen aus Läufen und
Podesten möglich ist und zu erheblichen Beweh-
rungseinsparungen führen kann, weil die Scheibenbeanspruchung
in den Plattenebenen die Durchbiegung längs der Knicklinien
behindert und für die Platte so auch ohne die Anordnung von
Podestbalken eine Durchlaufwirkung erzielt wird.

Als erste Arbeit, in der die Faltwerkwirkung von Treppen
berücksichtigt wird, kann wohl der Aufsatz von Lem /22/ ange-
sehen werden. Er betrachtet das Tragverhalten einläufiger,
gerader Treppen mit einem oder zwei Podesten ohne Podest-
balken und gibt die Momentenverteilung sowie die aus der
Sprengwerk- bzw. Hängewerkwirkung resultierenden Horizontal-
kräfte an.

Bereits in Frühjahr 1937 wird von Suenson /31/ eine einfache
Näherung zur Berechnung von gegenläufigen, geraden Podest-
treppen ohne Träger gemäß Bild 9 angegeben. Dabei wird an den
Knicklinien eine starre Lagerung angenommen, für die die ver-
tikale Auflagerkraft aus der schraffierten Fläche in Bild
10 a) bestimmt werden kann. Ihre in Lauf- und Podestebene
wirkenden Komponenten N_L und N_P werden durch Scheibentrag-
wirkung zu den Wänden geleitet (Bild 10 b). Mit der Annahme,

daß nur Kräfte parallel zur Wandebene aufgenommen werden können ist in Bild 10 d) die Beanspruchung der umgebenden Treppenhauswände skizziert.

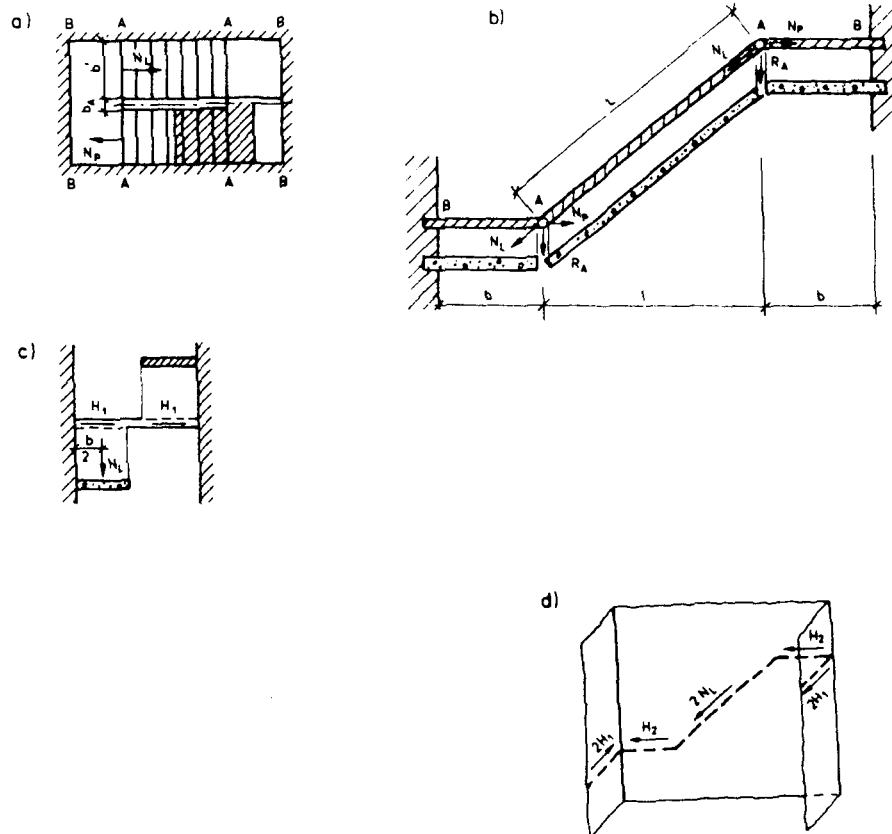


Bild 10: Belastung, statisches System und Scheibenkräfte aus der Treppengerechnung nach Suenson /31/

Auch von Born wird das Treppensystem aus Bild 10 in /2/ behandelt. Die Annahme der Lastabtragung über die starren Knicklinien (Faltwerkkanten) führt natürlich wiederum zu den aus /31/ bekannten Beziehungen für die Scheibenkräfte in den Treppenplatten und den Treppenhauswänden. Abweichend wird lediglich eine verfeinerte Belastungsaufteilung entsprechend Bild 11 vorgeschlagen. Gegenüber den Ansätzen nach Bild 10 wird damit der Horizontalschub in den Podesten verringert.

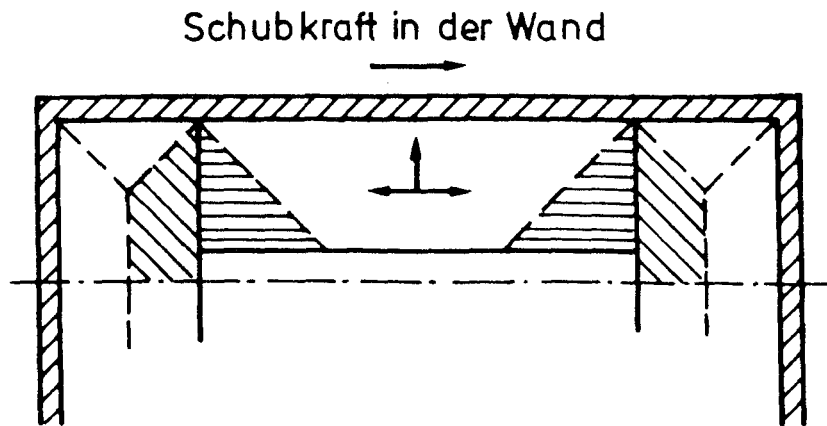


Bild 11: Belastungsverteilung einer rundum aufgelagerten Treppe nach /2/

Ausgehend von der Sprengwirkung bei einläufigen Treppen mit einem Podest nach Bild 12 wird von Fuchssteiner in /13/ ein weiter verfeinertes Tragmodell für die gegenläufige Treppe mit zwei Podesten abgeleitet.

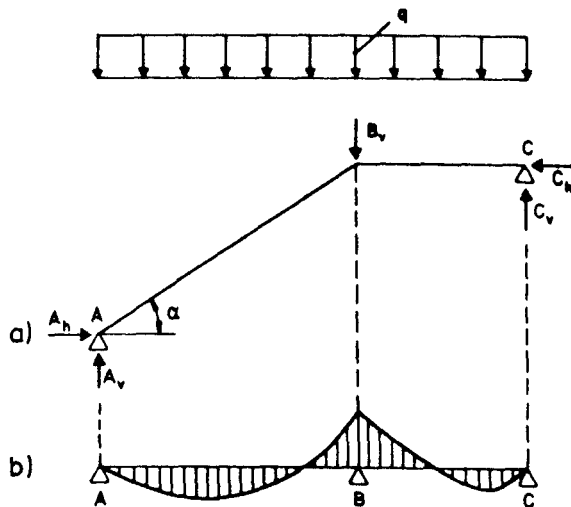


Bild 12:
Statisches System der
einläufigen Podest-
treppe und Momenten-
verlauf

Dabei wird vorausgesetzt, daß auch in der zweiläufigen Treppe mit Podesten - je nachdem, ob der Lauf und das Podest einen Grat oder eine Kehle bilden - Spreng- und Hängewerke entstehen. Diese verlaufen jedoch nicht mehr parallel zur Laufrichtung, sondern entsprechend Bild 13 schräg durch die Ecken der Laufplatten und parallel zu dieser so festgelegten Linie.

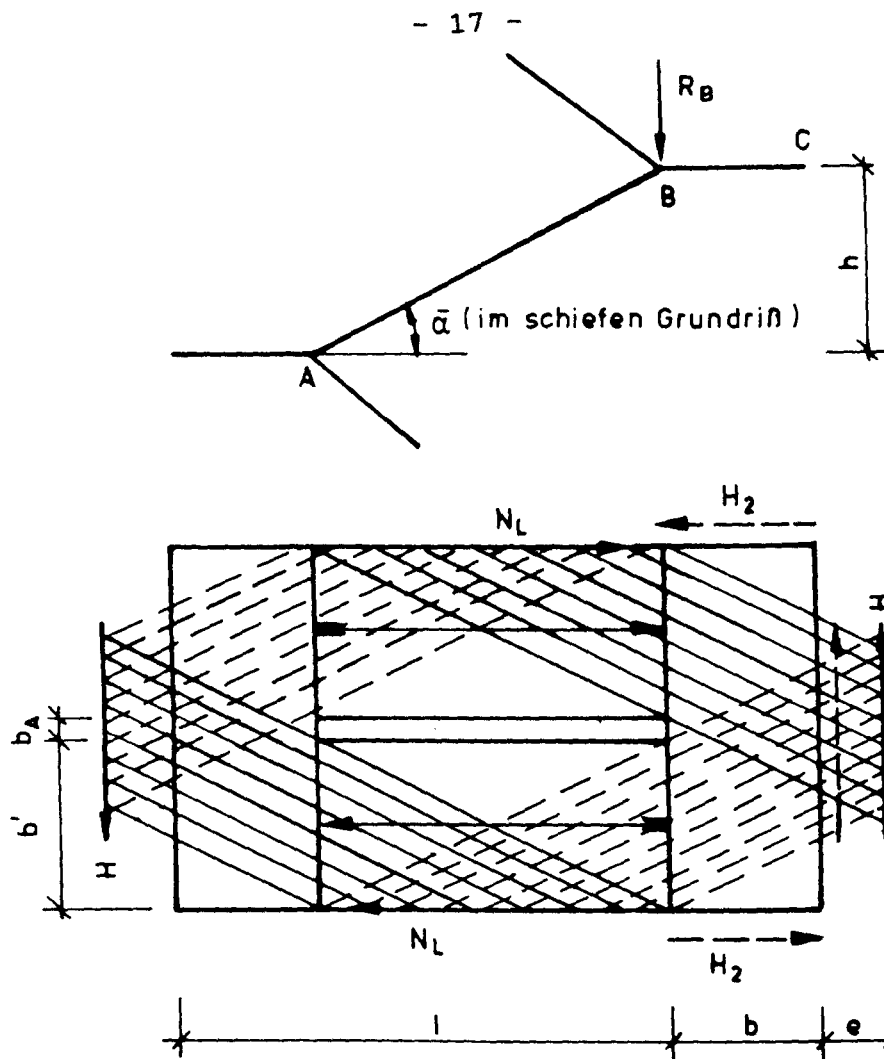


Bild 13: Statisches System der gegenläufigen Podesttreppe mit Spreng- und Hängewerk nach Fuchssteiner /13/

Mit dem im schiefen Grundriß gemessenen Winkel α und den Bezeichnungen nach Bild 13 ergeben sich die folgenden Beziehungen für die Spreng- und Hängekräfte.

$$N_{AB} = \frac{R_B}{h} \sqrt{l^2 + b'^2 + h^2}$$

$$N_{BC} = \frac{R_B}{h} \sqrt{l^2 + b'^2}$$

$$\tan \bar{\alpha} = \sqrt{\frac{h}{l^2 + b'^2}}$$

Bei Vollbelastung erhält man die Resultierenden wie folgt:

$$H = 2 \cdot N_{BC} \cdot \sin \beta = R_B \cdot \frac{2 b'}{h} \quad (2.1)$$

$$N_L = H \cdot \frac{\cot \beta}{\cos \alpha} = R_B \cdot \frac{2}{h} \sqrt{l^2 + h^2} \quad (2.2)$$

Verschiebt man die Kraft H um das Maß e in die Podestkante, treten noch die Zusatzkräfte H_2 auf:

$$H_2 = H \cdot \frac{e}{2 b' - b_A} = R_B \cdot \frac{1}{h} \frac{(1 + \lambda) - 2 b}{(2 + \lambda)} \quad (2.3)$$

$$\text{mit } \lambda = \frac{b_A}{b'}$$

Binden die Läufe nicht seitlich in die Wände ein, können die Kräfte N_L nicht mehr direkt vom Lauf auf die Wand übertragen werden. Die Schubkraft H_2 an der Podestschmalseite errechnet sich dann wie folgt:

$$H_2 = R_B \cdot \frac{b'}{h} \cdot \frac{2 b + 1}{2 + \lambda} \quad (2.4)$$

Das die Ausnutzung der Faltwerkwirkung auch senkrecht zu den Wandebenen wirkende Kräfte hervorufen kann verdeutlicht Bild 14 am Beispiel einer einseitig in eine Wand eingebundenen Treppe.

Die von Fuchssteiner /13/ entwickelten Beziehungen für die Scheibenbeanspruchungen bei Treppen wurden von Rosman in /26/ für verschiedene Auflagerungsvarianten weiterentwickelt. Dabei führen diese Ableitungen naturgemäß zu Ergebnissen, wie sie sich analog auch nach der Modellvorstellung mit den Spreng- und Hängewerken ergeben. Eine Übersicht der Kraftwirkungen entsprechend /26/ zeigt Bild 15.

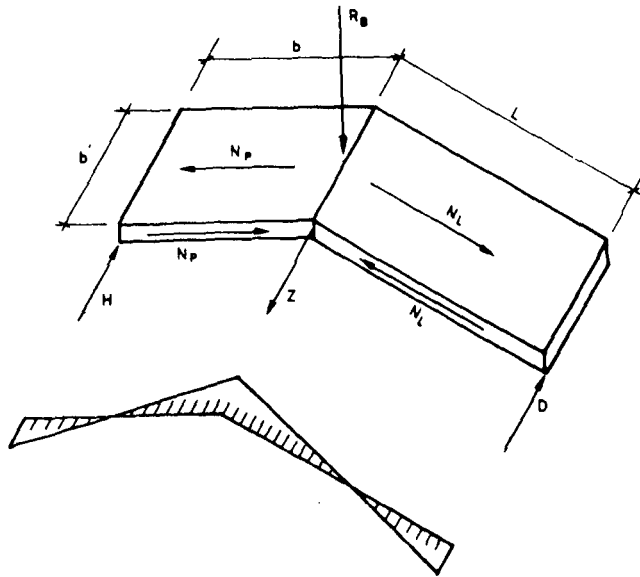


Bild 14:
Faltwerkwirkung
einer einseitig
aufgelagerten
Treppe nach /13/

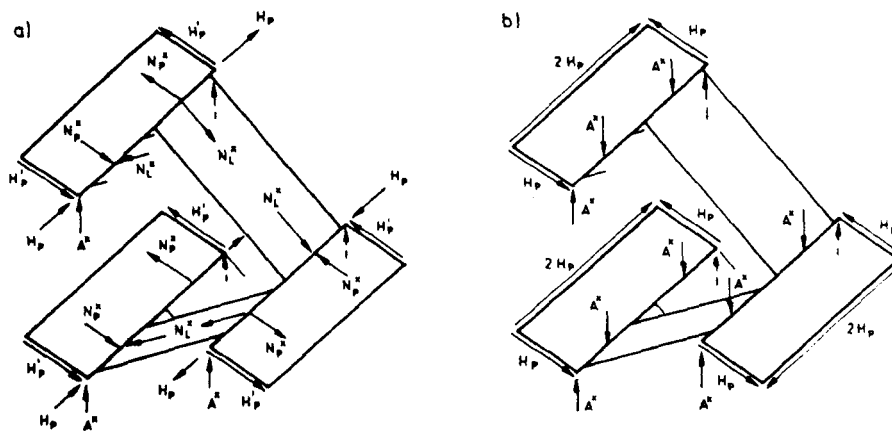


Bild 15: Scheiben- und Auflagerkräfte der gegenläufigen
Podesttreppe ohne Einbindung der Läufe in die
Seitenwände.

- a) Es sind auch rechtwinklig zu den Seitenwänden
wirkende Auflagerkräfte vorhanden.
- b) Es sind ausschließlich in den Wandebenen wirkende
Auflagerkräfte vorhanden.

3 Planung der Versuche zum Tragverhalten gerader, gegenläufiger Podesttreppen

3.1 Ausbildung und Abmessungen der Versuchskörper

Da die Läufe bei geraden, gegenläufigen Treppen gegenüber den Podesten sowohl nach unten als auch nach oben abgewinkelt sein können und die Stützung an den Knicklinien entscheidend von der gegenseitigen Anordnung der Bauteile bestimmt wird, erfolgten die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Forschungsarbeit jeweils an Versuchskörpern aus zwei Podesten und zwei Läufen. Die Untersuchung eines repräsentativen Tragwerksausschnittes war so sichergestellt, da für die Läufe als auch die Podeste verschiedene Auflagerungs- und Einspannverhältnisse bestanden. So war z.B. das obere Podest nur mit einem Lauf verbunden während an das untere Podest zwei Läufe angrenzten. Beide Podeste wurden an ihren Schmalseiten aufgelagert. Zur Verbesserung des Schallschutzes und im Hinblick auf die zum Teil vergleichsweise hohen Kosten zur Herstellung von Auflagerlinien, wird diese Auflagerung auch in der Baupraxis häufig gewählt. Da Einspannungen im Versuch nur schwer nachzubilden sind, wurden alle Auflagerlinien gelenkig ausgeführt.

Die Wahl eines so umfassenden Tragwerksausschnittes wäre bei Verwendung wahrer Bauteilabmessungen und realistischer Durchgangshöhen allerdings kaum möglich gewesen, da eine dann notwendige Verringerung der Stützweiten nur begrenzt akzeptabel ist, wenn nicht aus der Wahl zu gedrungener Querschnitte unzutreffende Tragwirkungen und Einflüsse entstehen sollen, die den wirklichen Verhältnissen der in der Baupraxis überwiegenden schlanken Plattenquerschnitte nicht gerecht werden. Um dies zu vermeiden, aber auch um den Transport des Versuchskörpers mit den in der Prüfhalle zur Verfügung stehenden Kränen zu ermöglichen und die aufzubringenden Lasten zu begrenzen, wurden die Versuchskörper im Maßstab 1 : 2 verkleinert. Dabei ist gewährleistet, daß die aus der Wahl dieses naturnahen Verkleinerungsmaßstabs resultierenden Abmessungen des Treppensystems groß genug sind, um Imperfektionen aus örtlichen Schwankungen in den Materialgütern, der statischen

schen Höhe und dem Verbundverhalten weitgehend auszugleichen. Trotzdem liefern bereits wenige Versuche repräsentative Ergebnisse und der Herstellungsaufwand konnte so zugunsten der Anforderungen an die Versuchs- und Meßeinrichtung begrenzt werden. Auch unter Berücksichtigung der innerhalb eines Versuchskörpers enthaltenen Variationen kann daher schon die geringe Anzahl von zwei Versuchen, die im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführt wurden, für die Erzielung aussagekräftiger und umfassender Hinweise zum Tragverhalten von Treppen genutzt werden.

Die Schalmaße beider Versuchskörper (nachfolgend als Treppe 1 und Treppe 2 bezeichnet) und die Anordnung der Bauteile zueinander sind aus den Bildern 16 und 17 ersichtlich. Ein wichtiger Unterschied zwischen den Versuchskörpern bestand darin, daß der obere Lauf bei Treppe 1 gelenkig auf dem unteren Podest aufgelagert war. Bild 18 zeigt dieses Auflagerdetail. Diese Lösung ist besonders für solche Anwendungsfälle von Interesse, bei denen die Faltwerkwirkung auch für vorgefertigte Treppen ausgenutzt werden soll. Fertigteile, die jeweils aus einem Podest und einem Lauf bestehen, ermöglichen die Herstellung gerader gegenläufiger Podesttreppen entsprechend Bild 19 durch spiegelbildliche Montage. Dabei erlaubt die monolithische Verbindung zwischen dem Lauf und dem Podest die Ausbildung der stützenden Faltwerkwirkung. Für die Plattentragwirkung bestand damit gegenüber dem Versuchskörper Treppe 2, bei dem alle Bauteile untereinander monolithisch verbunden waren, eine Variation der Einspannverhältnisse und eine verminderte Stützung des unteren Podestes über die Breite des oberen Laufes.

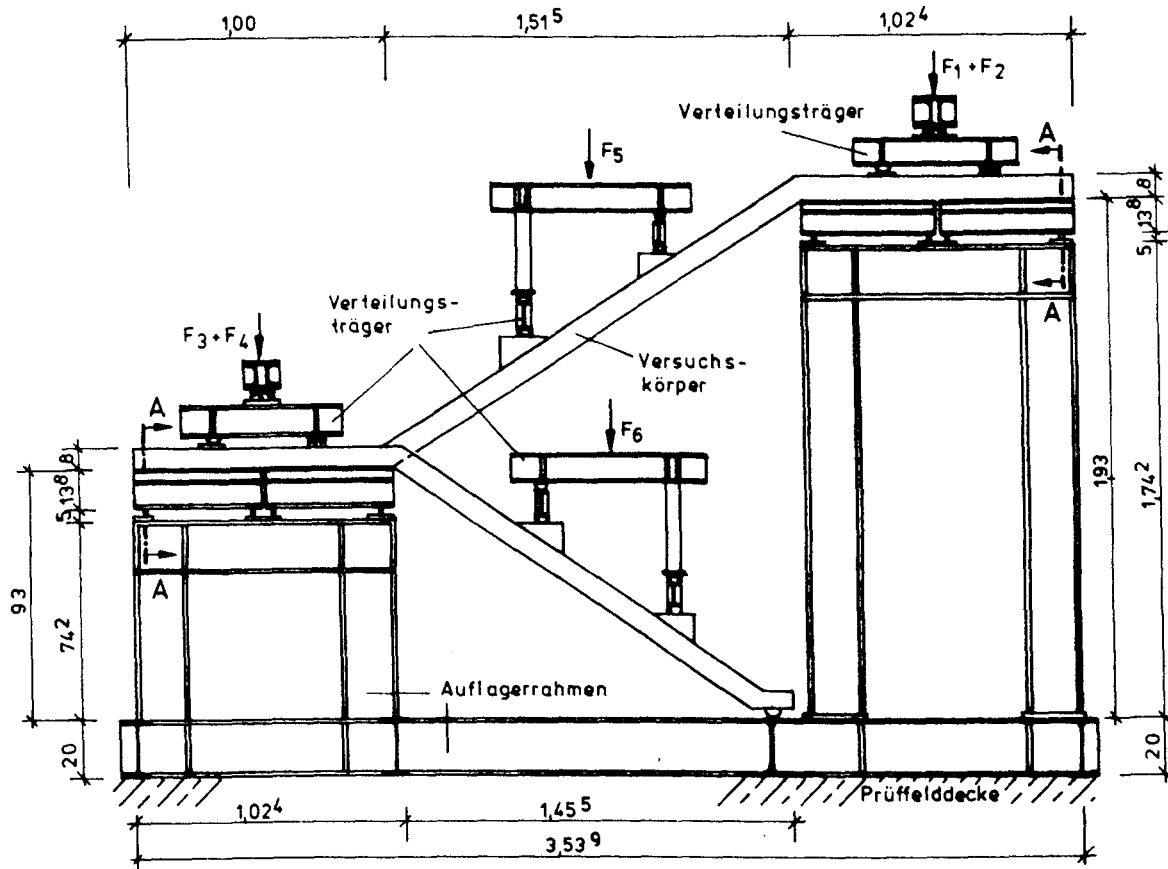


Bild 16: Schnitt durch den Versuchskörper mit den Verteilungsträgern der Belastungseinrichtung und dem Auflagerrahmen

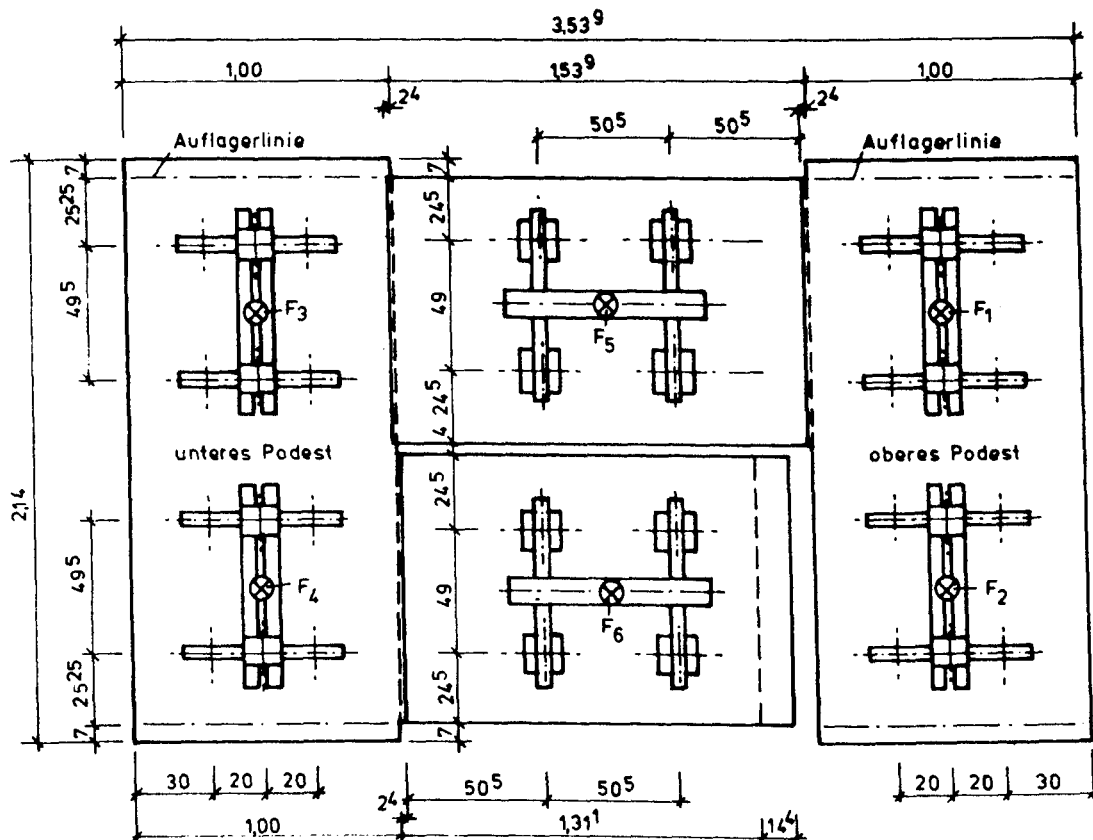


Bild 17: Grundriß des Versuchskörpers und der Verteilungsträger für die Belastung

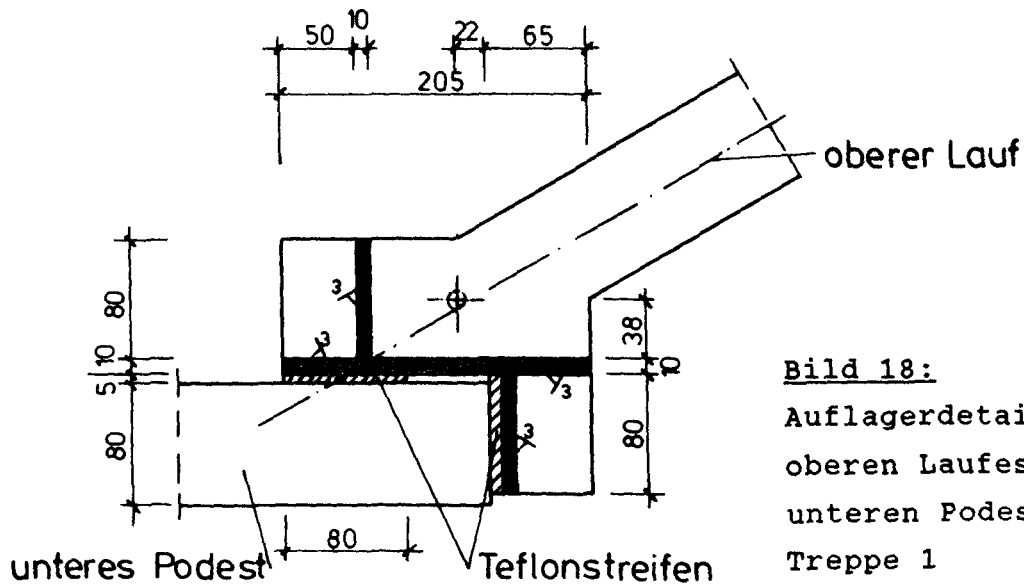


Bild 18:
Auflagerdetail des
oberen Laufes auf dem
unteren Podest bei
Treppe 1

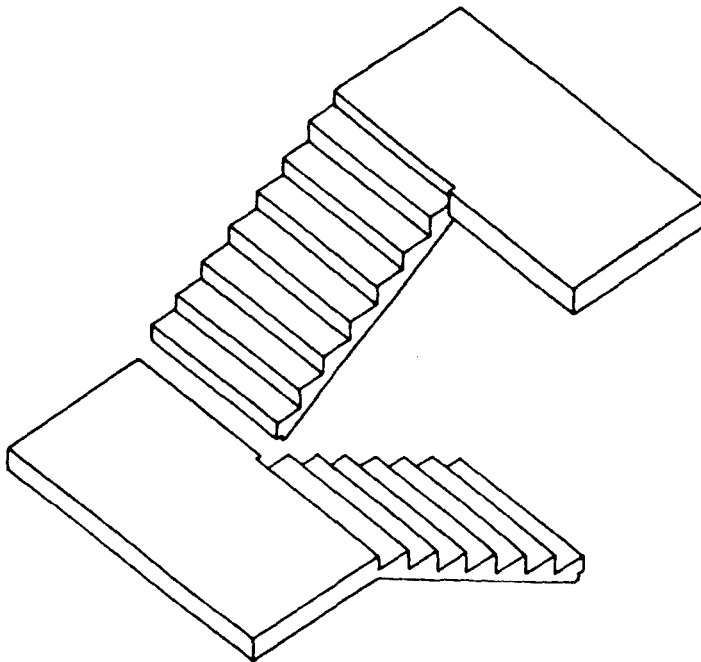


Bild 19:
Montage einer gegen-
läufigen, geraden Po-
desttreppe aus Fertig-
teilen

3.2 Beschreibung der Versuchskörper

3.2.1 Herstellung und Bewehrung

Die Herstellung der Versuchskörper erforderte im vorliegenden Fall insofern besondere Überlegungen, als das Verlegen der Bewehrung und das Betonieren aus betriebstechnischen Gründen nicht unmittelbar unter dem Prüfgerüst erfolgen konnten, mit dem die Belastung aufgebracht werden sollte. Der dadurch bedingte Transport der Versuchskörper zwischen der Herstellung und der eigentlichen Prüfung mußte jedoch ohne Lageänderung

der geometrisch komplizierten und vergleichsweise filigranen Versuchskörper vorgenommen werden, da anderenfalls die Gefahr des Entstehens von Vorschädigungen zu groß gewesen wäre.

Diese Überlegungen führten dazu, in der institutseigenen Werkstatt einen Auflagerrahmen aus handelsüblichen Walzstahlprofilen herzustellen, der sowohl als Schalungsträger bei der Herstellung als auch zur Auflagerung bei den Traglastversuchen diente. Er war zudem ausreichend verwindungssteif, um den Transport mit den in der Prüfhalle zur Verfügung stehenden Kränen zu ermöglichen. Ansichten des Auflagerrahmens enthalten die Bilder 16, 23 und 24. Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte in einer Holzschalung aus beschichteten Platten auf diesem Auflagerrahmen, so daß eine spätere Lageänderung entbehrlich war und nach dem Erhärten des Betons nur noch die Schalung entfernt werden mußte. Durch eigens dafür vorgesehene Transportsicherungen wurde die Lage der Versuchskörper bis zum Prüfbeginn fixiert.

Bei Treppe 1 wurde zuerst der untere Abschnitt bestehend aus dem unteren Lauf und dem unteren Podest betoniert. Am darauffolgenden Tag wurde die Schalung des oberen Abschnitts in dem Teil ergänzt, der das Auflagerdetail auf dem unteren Podest bildete (siehe Bild 18). Anschließend wurde der obere Abschnitt betoniert. Bei Treppe 2 erfolgte das Betonieren demgegenüber in einem Arbeitsgang. Bei beiden Versuchskörpern wurden die Läufe ohne obere Schalung betoniert. Die Verdichtung mußte daher in der Schräge mit größerer Vorsicht und behutsamerem Einsatz der sonst verwendeten Rüttelflasche (\varnothing 50 mm) vorgenommen werden, um ein Abrutschen des Betons nach unten zu vermeiden. Die geringe Plattendicke von $d = 8$ cm gewährleistete allerdings auch bei teilweiser Verdichtung von Hand noch ein ausreichend dichtes Gefüge ohne Fehlstellen.

Nach dem Betonieren wurden die freien Betonflächen mit feuchten Tüchern abgedeckt und der gesamte Versuchskörper mit einer Kunststoffplane umhüllt, um ein zu rasches Austrocknen zu vermeiden. Die Tücher wurden in regelmäßigen Abständen befeuchtet. Nach etwa 7 Tagen wurden die Versuchskörper teilweise ausgeschalt. Die in Bild 16 erkennbaren stufenartigen

Sockel zum späteren Absetzen der Belastungseinrichtung auf den Läufen wurden dann auf den bereits erhärteten Beton der eigentlichen Versuchskörper aufbetoniert. Erst unmittelbar unter dem Prüfgerüst wurden die Versuchskörper ganz entschalt.

Beide Versuchskörper waren kreuzweise mit Betonrippenstahl BSt 500/550, \varnothing 4 und \varnothing 5 bewehrt. Die Betonüberdeckung für die äußere Bewehrungslage betrug 1,0 cm. Mit dieser Bewehrung, deren genaue Lage in den Bildern A1 bis A3 des Anhangs dargestellt ist, sollte eine den baupraktischen Größenverhältnissen weitgehend entsprechende Durchsetzung des Betons mit Bewehrungsstahl erreicht werden. Zur Erzielung aussagekräftiger Versuchsergebnisse sollte der auf die Plattendicke bezogene Bewehrungsgrad von $\mu = 0,16 \%$ bis $\mu = 0,31 \%$ gewährleisten, daß ein schlagartiges Versagen beim Aufreißen des Betons vermieden wird, wie es zu erwarten ist, wenn die vom Beton aufnehmbare Zugkraft größer ist als die aufnehmbare Stahlzugkraft. Darüber hinaus wurde angestrebt, daß der Stahl vor dem Erreichen der Traglast der Treppe die Fließgrenze überschreitet. Dies sollte an den für die Tragfähigkeit bedeutenden Punkten möglichst gleichzeitig geschehen, um allzu große Lastumlagerungen innerhalb des Versuchs zu vermeiden und eine gleichmäßige Ausnutzung des gesamten Versuchskörpers zu erreichen. Durch die Versuchskörper wurden somit "schwach bewehrte" Plattentreppen, wie sie in der Baupraxis vorherrschen, wirklichkeitsnah nachgebildet.

Einen aufschlußreichen Überblick der als charakteristisch anzusehenden Bewehrung des unteren Podestes zeigen die Ausschnitte in den Bildern 20 bis 22. Hingewiesen sei vor allem auf die entsprechend der Zielsetzung des Forschungsvorhabens fehlende Verstärkung der Bewehrung entlang der Knicklinie in Bild 20 und auf die kurze Verankerungslänge der unteren Podestbewehrung senkrecht zur Knicklinie in Bild 22.

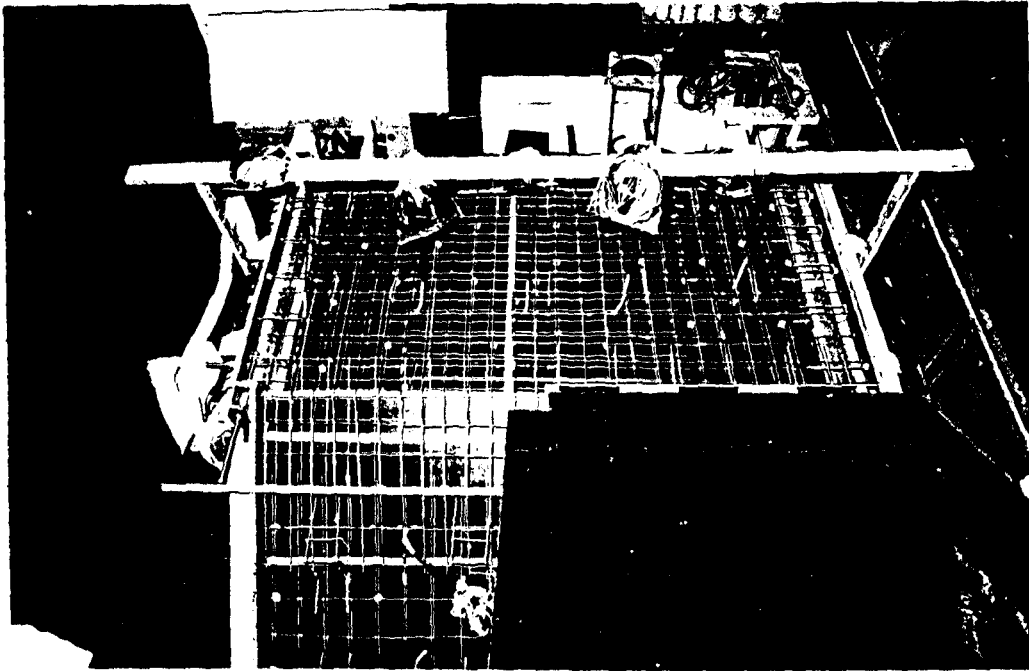


Bild 20: Ansicht der Bewehrung des unteren Podestes und an der Knicklinie bei Treppe 1



Bild 21: Bewehrung an der Knicklinie des unteren Podestes bei Treppe 2



Bild 22: Untere Podestbewehrung mit geradem, nicht abgewinkeltem Ende an der Knicklinie bei Treppe 2

3.2.2 Baustoffe und Materialeigenschaften

Für die Versuchskörper wurde ein Beton mittlerer Festigkeit angestrebt, der am Prüftag etwa der Güte eines B 35 entsprechen sollte. Die gewählte Mischung wurde anhand eines Vorversuches und aufgrund vorliegender Erfahrungen insbesondere auch im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit, die entscheidend durch die hier vorgegebenen Randbedingungen bestimmt wurde, festgelegt. Eine ausführliche Übersicht der verwendeten Betonzusammensetzungen enthält Tabelle 1.

Bauteil	Baustoffe/m ³ Beton in kg			w/z- Wert	Anteil der Korngruppen des Beton- zuschlags in %			Frisch- beton- rohdichte [kg/dm ³]	Aus- breit- maß [cm]	Ver- dich- tungs- maß V
	Zement	Zuschlag	Wasser		0/1	0/2	0/8			
Treppe 1 unten	324	1858	208	0,64	5	30	65	2,39	33,5	1,13
Treppe 1 oben	324	1865	199	0,61	5	30	65	2,39	33,5	1,11
Treppe 2	300	1720	180	0,60	5	30	65	2,41	36,0	1,08

Tabelle 1: Betonrezeptur und Frischbetoneigenschaften

Zur Bestimmung der wichtigsten Festbetonkennwerte wurden während des Betoniervorgangs Begleitkörper für die entsprechenden Materialprüfungen angefertigt. Die Würfel hatten die Abmessungen 150/150/150 mm, die Prismen 150/150/700 mm und die Zylinder einen Durchmesser von 10 cm. Die tatsächlich erreichten Betondruckfestigkeiten wurden jeweils nach 7 Tagen, nach 14 Tagen, bei Versuchsbeginn und nach 28 Tagen an Würfelproben bestimmt. Außerdem wurden bei Versuchsbeginn die Biegezugfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit und der E-Modul geprüft.

Um auch den Einfluß der unterschiedlichen Verdichtung zwischen den Läufen und den Podesten abschätzen zu können, wurden nach der Versuchsdurchführung aus weitgehend ungestört verbliebenen Bereichen Bohrkerne entnommen und daran die Druckfestigkeit ermittelt. Die Ergebnisse der Prüfungen, die nach DIN 1048 /34/ durchgeführt wurden, enthält Tabelle 2. Die darin für die Bohrkerne angegebenen Festigkeiten zeigen, daß die Werte für die Podeste tatsächlich deutlich über denen für die Läufe liegen.

Die Materialeigenschaften des verwendeten Betonstahls der Güte BSt 500/550 wurden an sechs Proben bestimmt. Sie sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Zeitpunkt	Festigkeit	Treppe 1 unten	Treppe 1 oben	Treppe 2
im Alter von ~ 60 Tagen	Druckfestigkeit der Bohrkerne β_w [N/mm ²]	Lauf 37,8 Podest 45,8	Lauf 48,1 Podest 45,4	—
im Alter von 28 Tagen	Betonwürfeldruckfestigkeit Lagerung wie Versuchskörper β_w [N/mm ²]	51	46	47
bei Versuchs- beginn T1 37 Tage T2 42 Tage	Betonwürfeldruckfestigkeit Lagerung nach DIN 1048 β_w [N/mm ²]	55	52	50
	Lagerung wie Versuchskörper β_w [N/mm ²]	56	49	51
	Biegezugfestigkeit β_{Bz} [N/mm ²]	3,31	3,36	3,84
	Spaltzugfestigkeit β_{sz} [N/mm ²]	3,82	3,58	3,00
	E-Modul E_B [N/mm ²]	25,8	21,57	25,12
im Alter von 28 Tagen	Zylinderdruckfestigkeit Lagerung nach DIN 1048 β_{C28} [N/mm ²]	46	41	41

Tabelle 2: Festbetonkennwerte aus den Materialuntersuchungen

Probe Nr.	Ø Nenn [mm]	Ø Ist [mm]	Querschnitt Ist [mm ²]	Streckgrenze bez. auf Ist Ø β_s [N/mm ²]	Zugfestigkeit bez. auf Ist Ø β_z [N/mm ²]	Bruch- dehnung [%]
1	4	3,92	12,07	729	795	8,8
2	4	3,92	12,04	723	783	10,0
3	4	3,92	12,04	723	789	8,8
i. M.		3,93	12,10	727	793	8,8

Tabelle 3: Ergebnisse der Zugfestigkeitsprüfung an den Betonstahlproben

3.3 Beschreibung des Versuchsstandes

3.3.1 Allgemeines

Die vorab im Zusammenhang mit der Herstellung der Versuchskörper aufgezeigten schwierigen Randbedingungen, die sich vor allem aus der vergleichsweise komplizierten Geometrie ergaben, erforderten auch im Hinblick auf die Ausbildung des Versuchsstandes, dessen Konzeption den Erfolg der Traglastuntersuchungen entscheidend bestimmt, eingehende Überlegungen, da naturgemäß keine komplette Prüfeinrichtung vorhanden war und lediglich das große Prüfgerüst des Instituts als Widerlager beim Aufbringen der Last in den Versuchsaufbau einbezogen werden konnte.

Da auf die Entwicklung des Auflagerrahmens bereits hingewiesen wurde, seien hier nur die wichtigsten Überlegungen angedeutet, die dabei für die eigentliche Versuchsdurchführung zu berücksichtigen waren und deren Lösungen nachfolgend als Vorzüge der gewählten Prüfmethode zusammengestellt sind, bevor einzelne Detailpunkte und das Meßprogramm eingehend beschrieben werden:

- Die Verformungen der Versuchskörper erfuhren keine oder nur sehr unwesentliche Behinderungen.
- Der Aufbau des Versuchsstandes insbesondere der Einbau und das Aufbringen der Meßeinrichtungen, Meßelemente und Anschlußleitungen war zwar nicht in allen Bereichen bequem möglich, er konnte jedoch überall mit der für solche Aufgaben unabdingbaren Sorgfalt und Genauigkeit erfolgen.
- Die Beobachtung des Verformungsverhaltens und zum Teil sogar der Rißentwicklung war bis zum Bruch gefahrlos möglich.
- Die Aufnahme des Rißbildes und das Messen der Rißbreite waren an allen Versuchskörperflächen möglich und wurden bis nahe zum Erreichen der Bruchlast durchgeführt.

Eine anschauliche Übersicht des Versuchsstandes mit den wichtigsten Detailpunkten geben die folgenden Bilder.

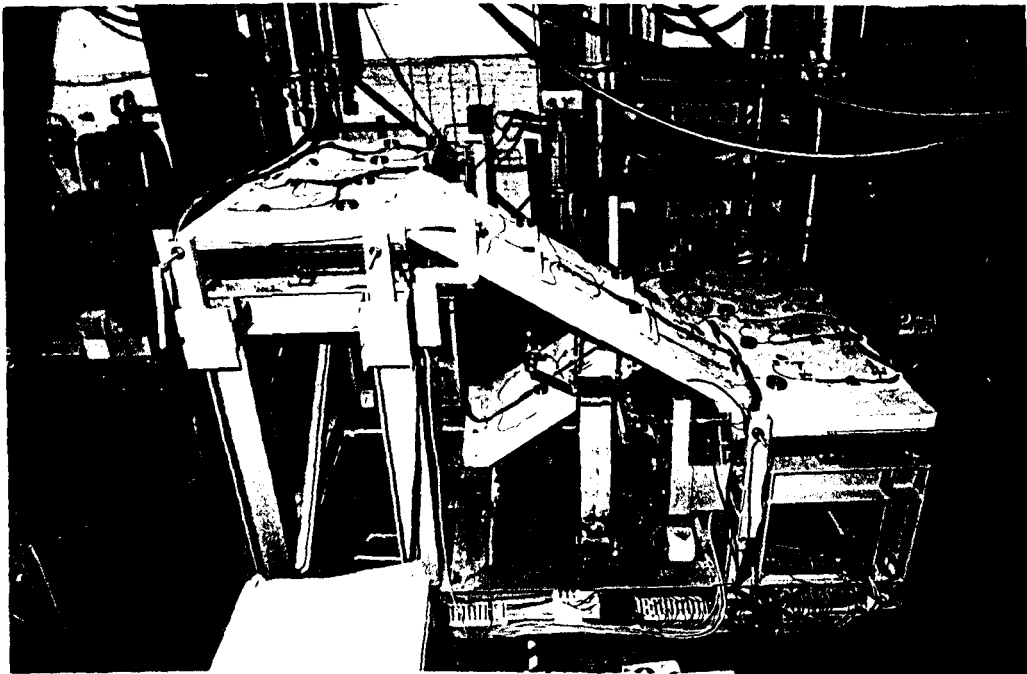


Bild 23: Ansicht des Versuchsstandes vor dem Auflegen der Verteilungsträger auf die Belastungspunkte

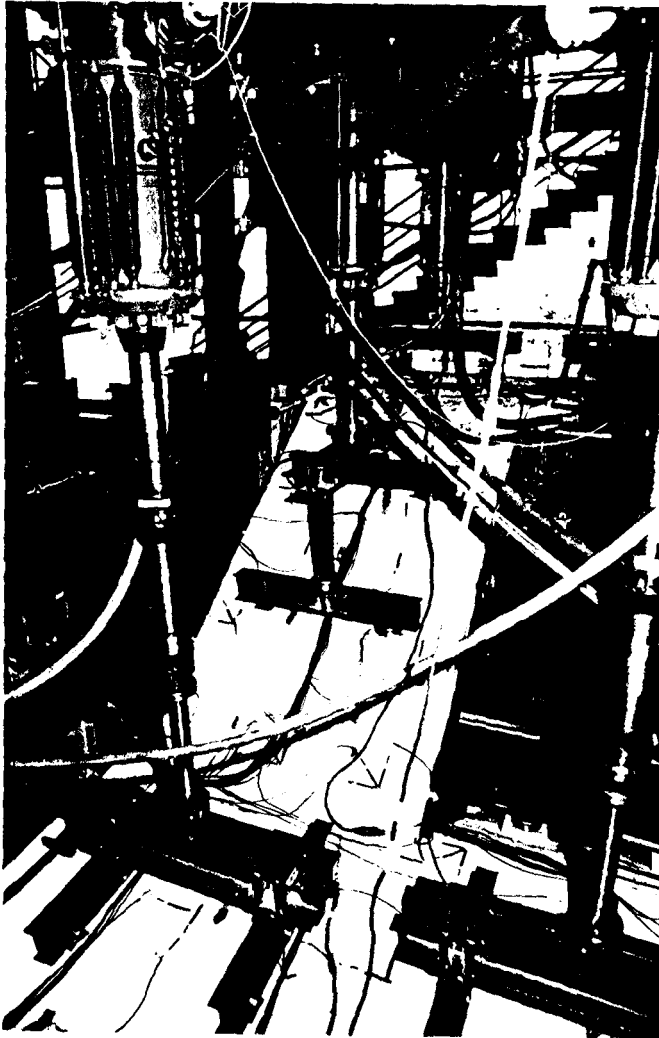


Bild 24:
Pressen mit Lastver-
teilungsträgern

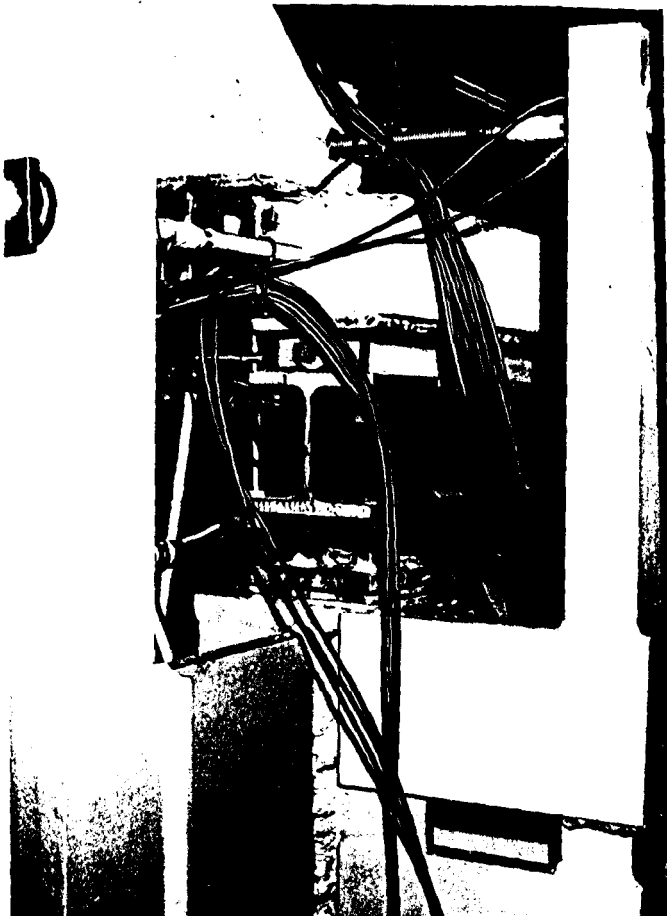


Bild 25:
Auflagerung des oberen
Laufs auf dem unteren
Podest und Auflagerung
des unteren Podests
mit horizontalen Fest-
haltungen

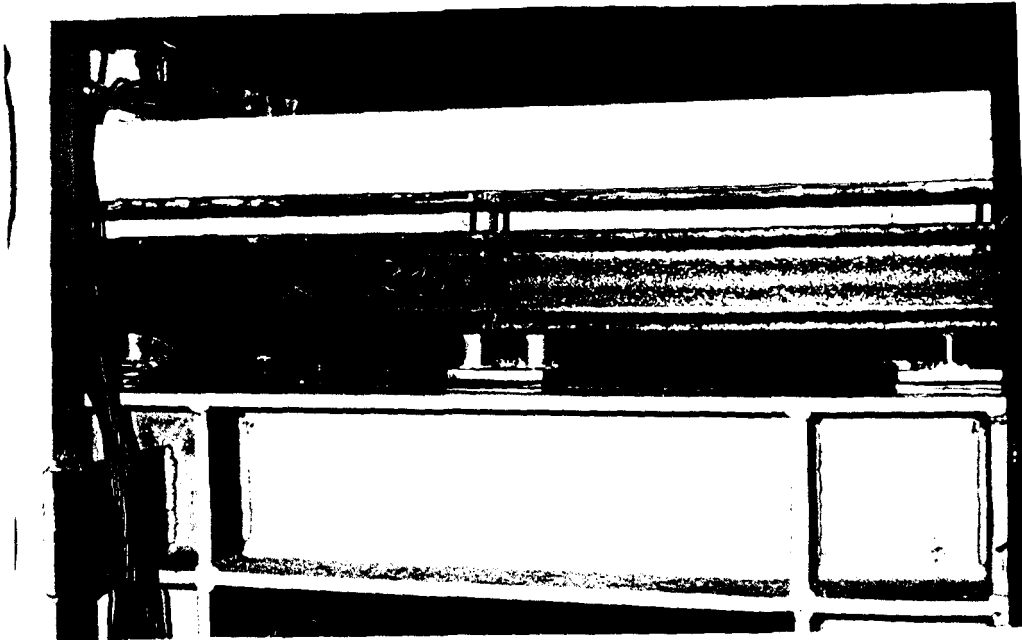


Bild 26: Auflagerlinie des unteren Podestes

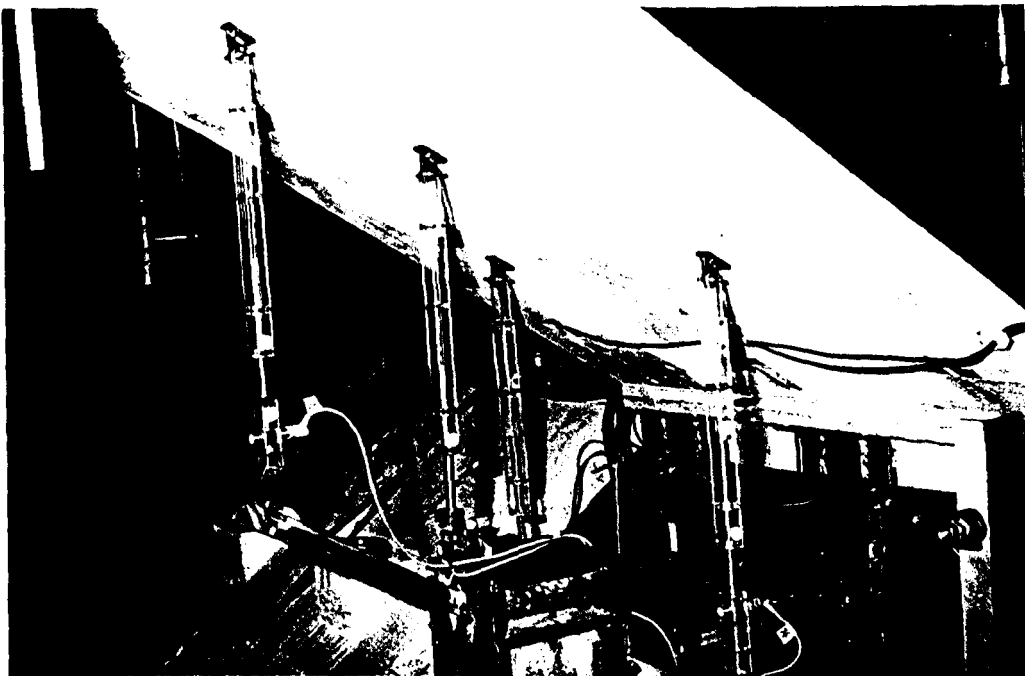


Bild 27: Anordnung der Wegaufnehmer unter dem oberen Lauf

3.3.2 Belastungseinrichtung

Die Belastung der Versuchskörper wurde jeweils mit sechs hydraulischen Öldruckpressen aufgebracht, die über vier Steuerpulte so geregelt werden konnten, daß jedes Bauteil unabhängig voneinander belastet werden konnte. Die Belastungsgeschichte wurde zusätzlich an einem Vier-Kanal-Schreiber kontinuierlich aufgezeichnet und konnte somit unabhängig von

den Steuerpulten überprüft werden. Alle sechs Pressen gaben ihre Lasten über ein System jeweils statisch bestimmt gelagerter Verteilungsträger auf die Podeste und Läufe ab (siehe hierzu Bilder 17, 18, 22 und 23). Zur Stabilisierung des Lastverteilungssystems wurden bei jedem Verteilungsträger allseits drehbare Kalottenlager auf der einen und Rollenlager auf der anderen Seite verwendet. Dadurch konnten sich die Verteilungsträger entsprechend der Biegefläche der Podest- und Laufplatten beliebig gegeneinander verdrehen, ohne daß Zwängungskräfte auftraten.

Dieses Lastverteilungssystem, bei dem die Last auf den Läufen über vier und auf den Podesten über acht Punkte abgesetzt wurde, kam einer gleichmäßig verteilten Flächenlast sehr nahe und bewährte sich auch unter den größeren Verformungen bis unmittelbar zum Eintritt des Bruches.

3.3.3 Auflagerung der Versuchskörper

Versuchsdaten sollen auch zur Überprüfung von rechnerisch ermittelten Ergebnissen und zu Vergleichszwecken herangezogen werden. Dafür müssen die Lagerungsbedingungen nachvollziehbar sein und den idealisierten Annahmen in einer Berechnung möglichst entsprechen. Die an den Schmalseiten zweiseitig aufgelagerten Podestplatten und die Linienlagerung des unteren Laufes sollten daher möglichst weitgehend den Lagerungsbedingungen nach Navier genügen, das heißt, sie sollten eine frei drehbare Lagerung der Ränder auf unnachgiebiger Unterlage aufweisen. Während dies beim unteren Lauf mit der Anordnung eines Halbrunds aus Baustahl, das über einen dünnen Teflonstreifen auf dem Auflagerahmen auflag, einfach zu erreichen war, wurden diese Anforderungen bei den Podesten mit dem aufwendigeren Ausführungsdetail gemäß den Bildern 25, 26 und 28 erfüllt.

Danach lagen die Podeste der Versuchskörper entlang der Schmalseiten auf je zwei Stahlrollen oder Stahlhalbrollen, die die Verdrehbarkeit ermöglichten und jeweils wiederum auf einem Walzträger lagen. Diese Walzträger, zwei je Auflagerlinie, waren entsprechend Bild 26 an drei Punkten auf gehär-

teten Kugeln statisch bestimmt gelagert. Der Aufbau wurde durch meßtechnische Erfordernisse bestimmt. Er wird in Abschnitt 3.4 näher erläutert. Die Anordnung dieser Punkte im Grundriß zeigt Anlage A7.

Die Ausnutzung der Faltwerkwirkung bei Treppen ist zwangsläufig an die Bedingung geknüpft, daß Horizontalkräfte aufgenommen werden können. Auch an den Versuchskörpern waren somit horizontale Festhaltungen anzubringen, um eine horizontal unverschiebliche Lagerung zu gewährleisten. Diese horizontalen Festhaltungen bestanden aus einbetonierten Stahlgewindestangen, die an ihrem freien Ende mit am Auflagerrahmen verschweißten Profilen verschraubt waren (siehe Bilder 23 und 25). Dabei war zwischen dem Profil und der Verschraubung eine Kugelkalotte integriert, die die Verdrehung der jeweiligen Festhaltung bei zunehmender Durchbiegung des Versuchskörpers erleichtern sollte. Die Anzahl der horizontalen Festhaltungen war so gewählt, daß jedes Podest für sich unverschieblich gehalten war. Diese Anordnung der Festhaltungen entspricht dem in der Baupraxis meist zu erwartenden Regelfall und ist auch bei nur zweiseitiger Auflagerung der Podeste einfach zu realisieren. Eine Darstellung der Anordnung im Grundriß enthält Anlage A7.

3.4 Messungen bei der Versuchsdurchführung

Der Aufwand für derart hochinstrumentierte Versuche an komplexen Tragwerken, wie sie die in dieser Arbeit untersuchten Treppensysteme darstellen, ist nur vertretbar, wenn alle mit der Versuchsdurchführung gegebenen Informationsmöglichkeiten konsequent genutzt werden, um weitreichenden Aufschluß über die Beanspruchungen und Verformungen der Versuchskörper zu erhalten. Dabei ist im vorliegenden Fall auch noch zu berücksichtigen, daß Stahlbetontreppen bisher kaum Gegenstand experimenteller Untersuchungen waren und sich diese Untersuchungen /19,20/ darüberhinaus nur auf Einzelfragen der Konstruktion beschränkten. Die Meßwerterfassung mußte sich daher auch aus diesem Grund auf alle für die Bewertung des Trag- und

Verformungsverhaltens interessierenden Daten erstrecken. Folgende Messungen wurden hierzu durchgeführt:

- Durchbiegungen mittels induktiver Wegaufnehmer

Zur Beschreibung des Verformungsverhaltens waren insgesamt 26 induktive Wegaufnehmer - jeweils 8 unter den Podesten und 4 unter den Läufen - bei beiden Versuchen unter dem Versuchskörper angeordnet. Ihre Verteilung über den Grundriß ist in Anlage A4 dargestellt. Wegen der horizontalen Festhaltung der Podeste wurden nur lotrechte Wegaufnehmer eingebaut. Geringfügige horizontale Verschiebungen, die hier nur aus der Formänderung der Versuchskörper entstehen konnten, waren bezogen auf die vorhandene lotrechte Meßbasis unbedeutend.

- Betonstauchungen

Zur Messung der Betonstauchungen waren bei Treppe 2 insgesamt 59 Dehnmeßstreifen (Beton-DMS) unmittelbar auf die Betonoberfläche entsprechend Anhang A5 geklebt. Die Anordnung war so gewählt, daß sie die Erfassung der größten Betonstauchungen in den Biegedruckzonen für eine Momentenverteilung gewährleistete, wie sie bei Ausnutzung der Faltwerkwirkung erwartet werden konnte. Ergänzend zu der ohnehin großen Meßstellenzahl wurden bei Treppe 2 vorwiegend an den Knicklinien und im oberen Lauf einige Meßstellen zu genau gegenüberliegenden Rosettenpaaren aus Beton-DMS ergänzt. Hierdurch sollte versucht werden, Aufschluß über die Scheibenbeanspruchung und mögliche Richtungsabweichungen der Hauptmomente zu bekommen. Eine Übersicht enthält Anlage A6.

- Stahldehnungen

Um die Beanspruchung und Ausdehnung der vermeintlichen Zugzonen zu erfassen, waren Dehnmeßstreifen (Stahl-DMS) genau gegenüberliegend zu den Beton-DMS auf die Bewehrungsstäbe vorab aufgeklebt worden. Ihre Lage kann daher ebenfalls den Anlagen A5 und A6 entnommen werden. Die Stahl-DMS verliefen bei Treppe 2 natürlich auch im Bereich der Rosetten aus Beton-DMS nur in der jeweiligen Hauptbewehrungsrichtung.

- Auflagerkräfte

Die vertikalen und horizontalen Auflagerkräfte wurden an den nach Bild A7 festgelegten Punkten gemessen. Besondere Sorgfalt mußte dabei vor allem für die Bestimmung der vertikalen Auflagerkräfte verwandt werden. Die bereits erwähnte statisch bestimmte Auflagerung der Linienlager aus Rolle oder Halbrolle und Walzprofil erfolgte über abgedrehte Schrauben, die vorher geeicht worden waren, und aus deren Längenänderung (gemessen mit jeweils 2 DMS) sich somit die Auflagerkräfte errechnen ließen. Um Biegebeanspruchungen für diese Schrauben auszuschließen, war in den Schraubenkopf eine Kugel eingelassen, die für eine punktförmige Lasteinleitung sorgte. Unter den Schrauben lag ein Rollenkäfig, der die horizontale Verschieblichkeit dieser Auflagerpunkte gewährleistete. Den genauen Aufbau dieses Detailpunktes zeigen die Bilder 25 und 28.

Ebenso wie die vertikalen Auflagerbolzen waren auch die horizontalen Festhaltungen abgedreht und vorab geeicht worden. Ihre Anordnung war so gewählt, daß überwiegend Zugkräfte für diese Stäbe zu erwarten waren. Lediglich die Festhaltung H81 (siehe Anlage A7) am Fußpunkt des oberen Laufes bei Treppe 1 bildete eine Ausnahme. Die Dehnungsmessung erfolgte je Bolzen wieder über 2 DMS, die so angeklebt waren, daß sie bei einer nicht vollständig auszuschließenden Biegebeanspruchung etwa in der Nulllinie lagen. Um darüberhinaus den Biegewiderstand dieser Festhaltungen zu verringern wurde ihre Länge möglichst groß gewählt. Der Einfluß senkrecht zueinander angeordneter Festhaltungen auf das Ergebnis des jeweils anderen Bolzens wurde so verringert.

- Rißentwicklung und Rißbreiten

Am Ende jeder Laststufe wurden die Versuchskörper nach Rissen untersucht. Die Kennzeichnung neuer Risse mit geänderten Symbolen erlaubte daher die Verfolgung der Rißentwicklung. Bei einigen charakteristischen Rissen wurden die Rißbreiten mittels Rißbreitenmeßkamera ermittelt. Aus beiden Aufzeichnungen sind gute Aussagen bezüglich des Rißverhaltens möglich.

Die Betonstauchungen, Stahldehnungen, Durchbiegungen und Auflagerkräfte wurden bei jeder Laststufe gemessen. Dagegen wurden die Rißbreiten nur gemessen, wenn nennenswerte Änderungen gegenüber dem Zustand bei der vorangegangenen Messung eingetreten waren. In den Tabellen A8 und A9 ist eingetragen, bei welchen Laststufen Rißbreiten bestimmt wurden.

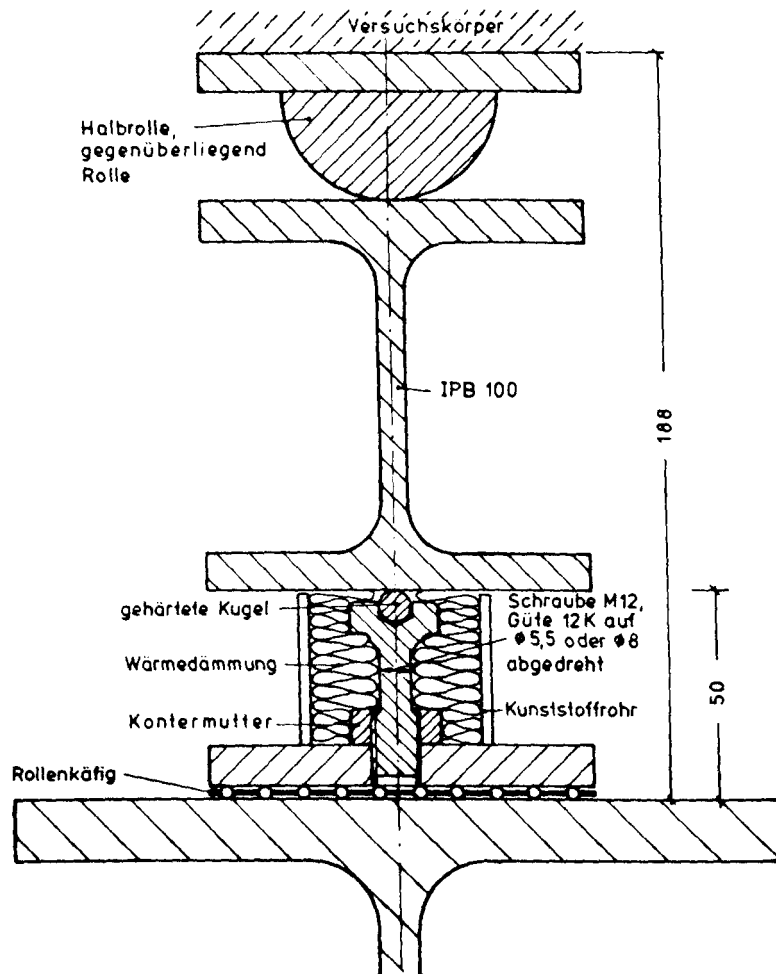


Bild 28: Schnitt durch die Auflagerlinie eines Podestes
(siehe auch Bild 25)

3.5 Versuchsablauf

Da die Anzahl der Versuche im Rahmen dieser Forschungsarbeit auf zwei begrenzt werden mußte, wurde der Ablauf jedes Versuches in mehrere aufeinander abgestimmte Belastungszyklen unterteilt, um so die mögliche Aussagekraft eines Versuches weitgehend auszunutzen. Vor dem eigentlichen Traglastversuch

mit der Belastungssteigerung bis zum Bruch, wurden daher zunächst die Läufe und Podeste nacheinander einzeln belastet. Nach der Entlastung wurden dann jeweils der untere Lauf und das untere Podest bzw. der obere Lauf und das obere Podest zusammen belastet. Einer gemeinsamen Belastung beider Podeste - zusammen mit dem oberen Lauf - folgte anschließend die Belastung aller Bauteile über einen Zeitraum von etwa 93 Stunden bei Treppe 1 und von etwa 50 Stunden bei Treppe 2.

Eine ausführliche Übersicht der Belastungsgeschichten enthalten die Tabellen in den Anlagen A8 und A9. Der bis hierher geschilderte Versuchsablauf sollte bei beiden Versuchskörpern - auch als Ersatz für eine wegen der großen Pressenanzahl zu aufwendige dynamische Belastung - die Beurteilung des Verhaltens unter Gebrauchslasten ermöglichen. Dazu wurde die Last unter allen erwähnten Beanspruchungskombinationen bis zum Entstehen erster feiner Risse gesteigert. Die Versuchsdurchführung zeigte, daß die Gebrauchslast trotz dieser einschränkenden Begrenzung sicher erreicht bzw. deutlich überschritten wurde. Eine zu weitreichende Schädigung der Versuchskörper wurde dabei in jedem Falle vermieden.

Im Anschluß an diese Gebrauchslastzyklen folgte jeweils der eigentliche Traglastversuch, bei dem alle Bauteile gleichzeitig bis zum Entstehen eines Bruches belastet wurden. Das Verhältnis der Lasten wurde dabei so gewählt, daß die auf einen m^2 Grundrißfläche bezogene Last für die Läufe und Podeste immer gleich groß war. Da das Versagen bei beiden Versuchskörpern im oberen Bereich eintrat und der untere Lauf sowie das untere Podest - abgesehen von den zum Teil schon recht ausgeprägten Rißbildungen - weitgehend unbeschädigt blieb, wurde dieser untere Abschnitt beider Versuchskörper nochmals so hoch belastet, daß auch hier ein Bruch eintrat. Dazu mußten vorab in beiden Fällen die horizontalen Festhaltungen am unteren Podest verstärkt werden. Ihre Verankerung war durch die stoßartige Beanspruchung, die beim Eintritt des ersten Bruches in begrenztem Maß auch für den unteren Bereich entstand, geschwächt worden.

4 Darstellung der Versuchsergebnisse

4.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die aus den Versuchen gewonnenen Meßergebnisse dargestellt. Dabei wird auf Interpretationen zunächst weitgehend verzichtet. Lediglich Erläuterungen, die zum Verständnis der Versuchsergebnisse erforderlich sind, werden an den betreffenden Stellen eingefügt. Die grafische Darstellung der Ergebnisse enthalten die Anlagen A11 bis A43. Darüberhinaus sind auch noch die genauen Zahlenwerte in den Tabellen A1 bis A26 zusammengestellt. Wegen der großen Datenmenge wurden dabei allerdings für beide Versuche nur die Meßdaten aus den Bruchlastzyklen berücksichtigt. Die Interpretation und Erläuterung der Versuchsergebnisse folgt im Abschnitt 5.

4.2 Durchbiegungen

Die Durchbiegungen beider Versuche sind für die Gebrauchslastzyklen, bei denen die Bauteile einzeln bis zur Entstehung erster Risse belastet wurden, in den Anlagen A11 und A12 abhängig von der Belastung dargestellt. Dabei wurden jeweils die Meßstellen des belasteten Bauteils aufgetragen und bei Belastung der Läufe zusätzlich die in der Verlängerung des Laufes angeordneten Meßpunkte der Podeste. Die nahezu lineare Durchbiegungszunahme an allen Meßstellen bestätigt, daß die Rißbildung bei diesen Lastzyklen tatsächlich ohne erkennbaren Einfluß geblieben ist. Ein Vergleich der Anlagen 11 und 12 zeigt, daß die Durchbiegung bei Treppe 1 (oberer Lauf vom unteren Podest getrennt) schon unter Gebrauchslasten deutlich größer ist als bei Treppe 2 (monolithische Verbindung aller Bauteile). Sie ist für das untere Podest etwa doppelt so groß und für die anderen Bauteile um etwa 50 % höher. Auffallend ist bei einer Gegenüberstellung der Versuche allerdings eine

erhebliche Übereinstimmung der Kurvenverläufe. Für die einzelnen Bauteile ergab sich in beiden Versuchen etwa die gleiche Reihenfolge von der Meßstelle mit der größten zu der mit der kleinsten Durchbiegung. Daneben ist das Verhältnis der einzelnen Meßwerte untereinander ähnlich. Diese zur Vergleichbarkeit der Versuche getroffenen Beobachtungen gelten auch für die Durchbiegungen während der Bruchlastzyklen, die in den Anlagen A13 bis A16 aufgetragen sind. Die Messungen bei Belastung der Einzelbauteile zeigen darüberhinaus Übereinstimmungen zwischen den beiden Podesten bzw. den beiden Läufen der Versuchskörper. Auf eine interessante Beobachtung sei in diesem Zusammenhang noch hingewiesen. Werden nur die Läufe belastet, so heben sich die freien Ränder der angrenzenden Podeste, in die der belastete Lauf einbindet. Die so entstandenen negativen Durchbiegungen (nach oben) der Meßstellen 7 und 28 in den Anlagen 11d, 12b und 12d können mit der Ausbildung eines Stützmomentes an den Knicklinien erklärt werden.

Zu den Durchbiegungen im Bruchlastzyklus mit Belastung aller Bauteile ist noch anzumerken, daß die Durchbiegung des oberen Podestes generell erheblich größer war als die des unteren Podestes und daß für beide Podeste eine gleichmäßige Durchbiegung am freien Rand und an der Knicklinie beobachtet wurde. Jeweils im zweiten Bruchversuch, bei dem nur noch der untere Abschnitt des Versuchskörpers belastet worden war, wurde demgegenüber die Durchbiegung am freien Rand größer als an der Knicklinie. Zur Veranschaulichung dieses Unterschiedes sind in den Bildern 29 bis 31 die aus den gemessenen Durchbiegungen durch programmgesteuerte Interpolation errechneten Höhenlinien (Linien gleicher Durchbiegung) der Podeste dargestellt.

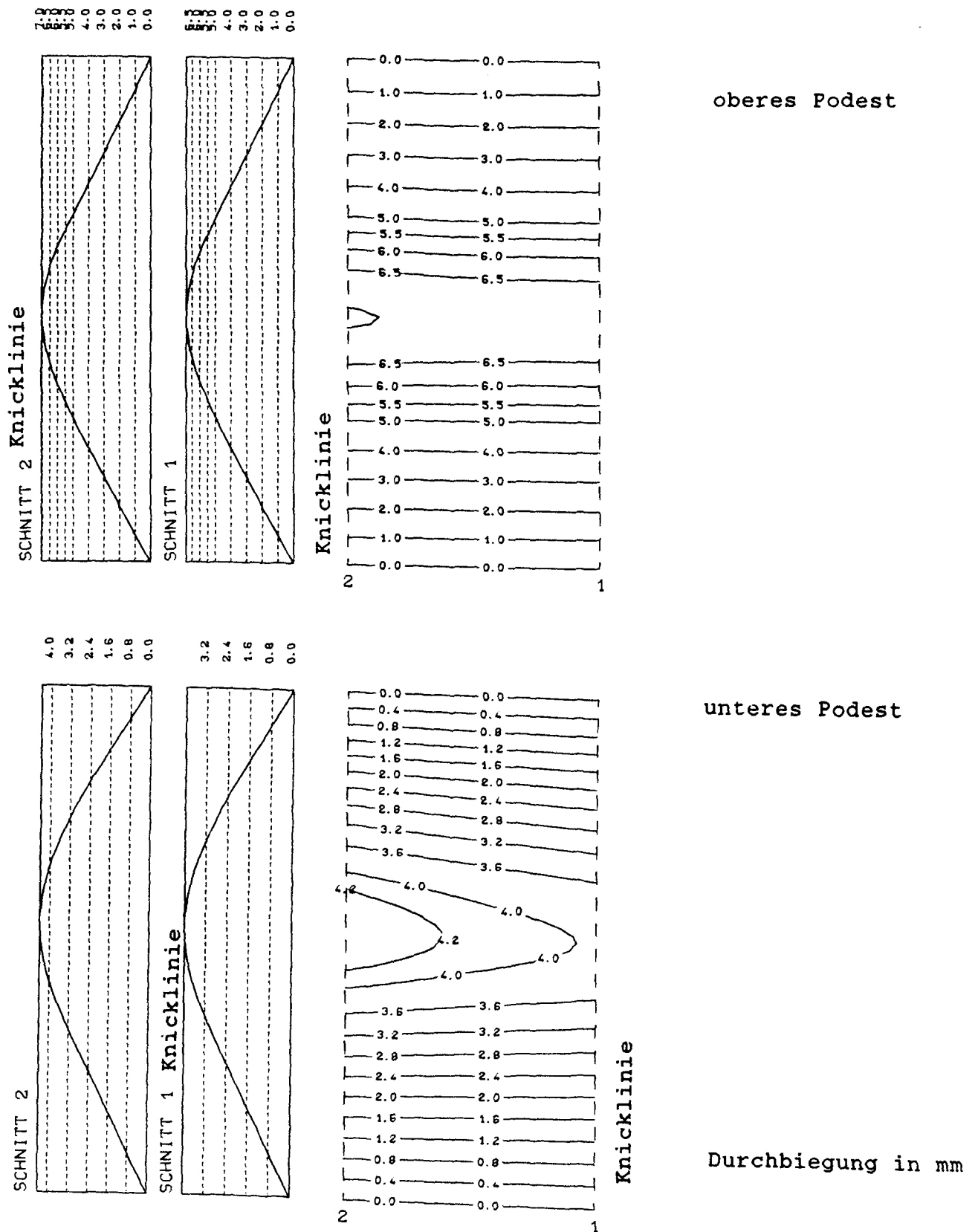


Bild 29: Linien gleicher Durchbiegung und Biegelinien für die Podeste der Treppe 1 bei Belastung aller Bauteile mit einer Gesamtlast von $F = 70 \text{ kN}$ ($\approx 10,0 \text{ kN/m}^2$).

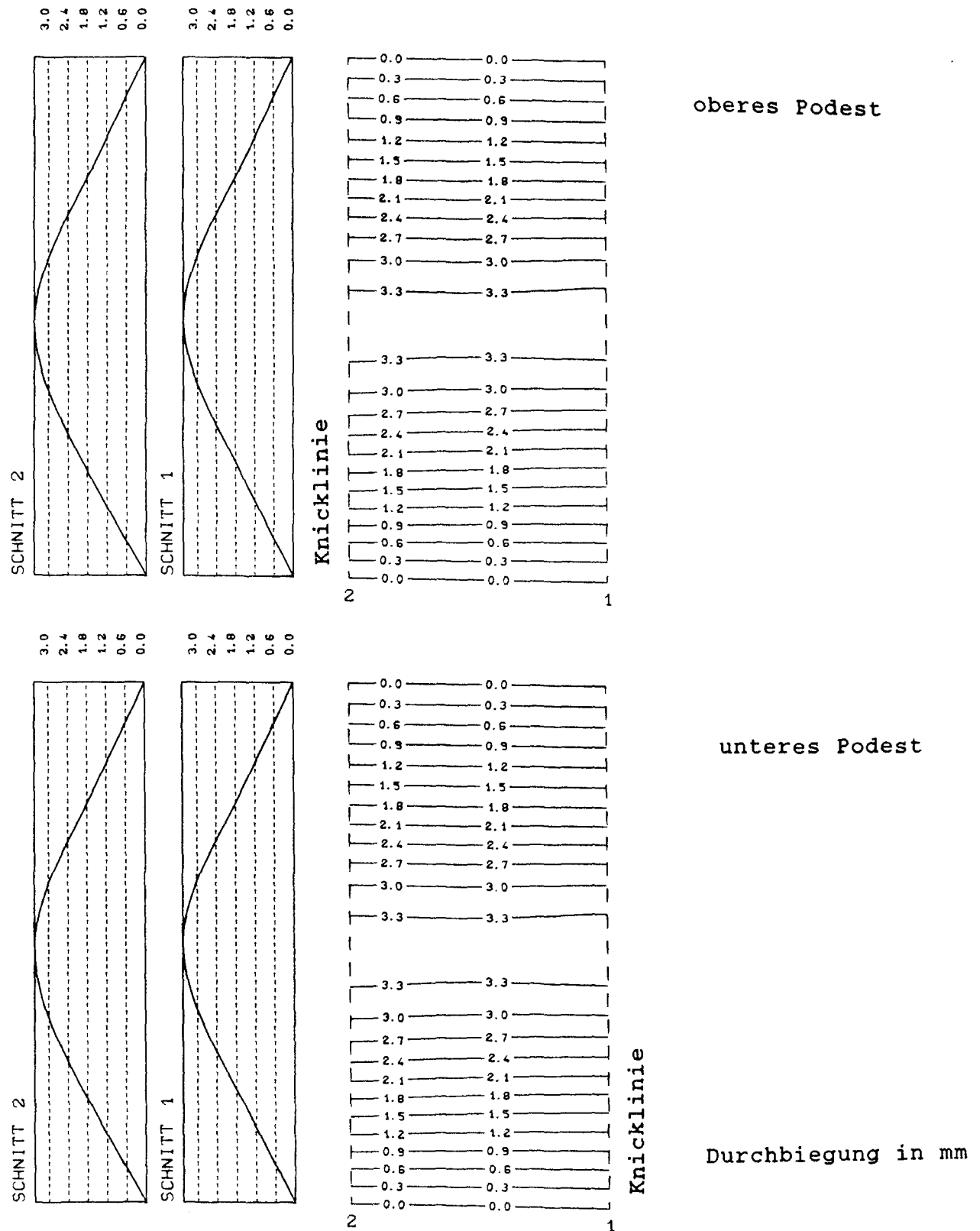
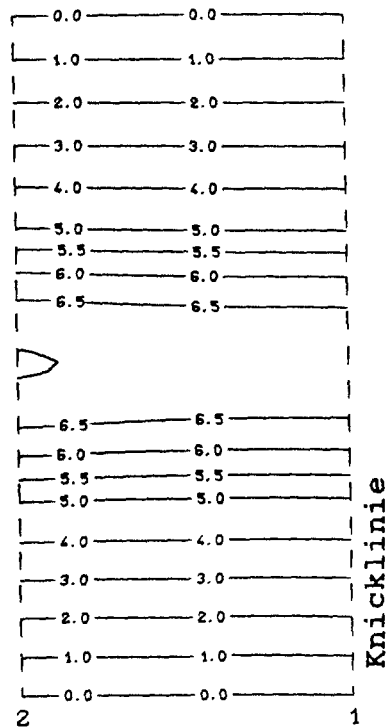
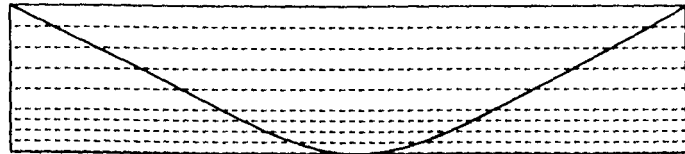


Bild 30: Linien gleicher Durchbiegung und Biegelinien für die Podeste der Treppe 2 bei Belastung aller Bauteile mit einer Gesamtlast von $F = 70 \text{ kN}$ ($\approx 10,0 \text{ kN/m}^2$).

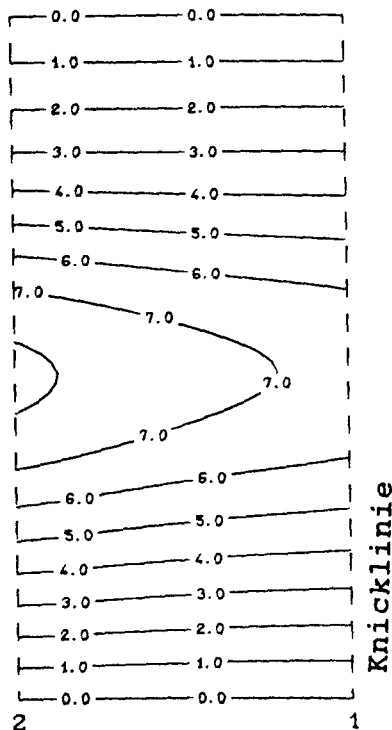
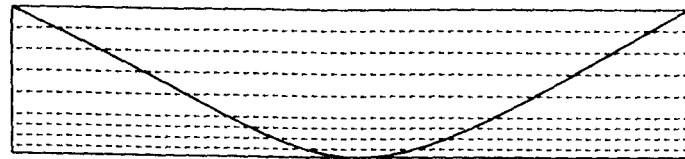


Treppe 1

SCHNITT 2



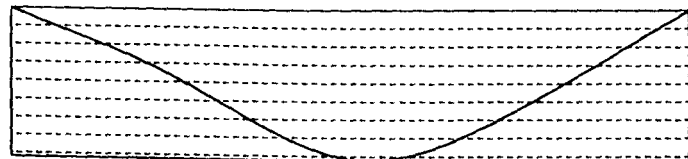
SCHNITT 1



Treppe 2

Durchbiegung in mm

SCHNITT 2



SCHNITT 1

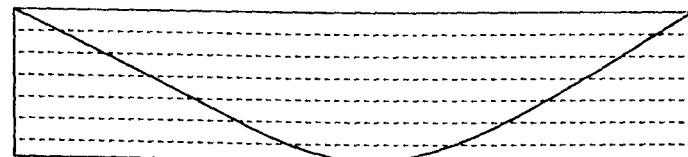


Bild 31: Linien gleicher Durchbiegung und Biegelinien für das untere Podest beider Versuchskörper im Bruchlastzyklus 2, jeweils bei Belastung des unteren Laufes und Podestes.

Gesamtlast: $F = 108,5 \text{ kN} \approx 31,0 \text{ kN/m}^2$ bei Treppe 1

$F = 115,5 \text{ kN} \approx 33,0 \text{ kN/m}^2$ bei Treppe 2

4.3 Betonstauchungen

Die Betonstauchungen der Versuchskörper sind in den Anlagen A17 bis A20 wiederum in Abhängigkeit der Belastung aufgetragen. Auf die Wiedergabe der in den Gebrauchslastzyklen gemessenen Stauchungen wurde verzichtet, da ihre Aussagekraft wegen der geringen Größe, die eine Verfälschung der Ergebnisse durch ungewollte Imperfektionen z.B. des Materials oder des Versuchsaufbaus begünstigt, als begrenzt anzusehen ist. Auch die Größenordnung der in den Bruchlastzyklen bestimmten Werte ist gering und bleibt meist bis unmittelbar zum Eintritt des Versagens deutlich unter $1,00 \text{ ‰}$. Dieses Ergebnis war wegen des niedrigen Bewehrungsgrades zu erwarten und überrascht daher nicht.

Abgesehen von wenigen Meßwerten geringer Größe wurden bei Belastung aller Bauteile mit den Beton-DMS ausschließlich Stauchungen gemessen. Dabei ergaben sich die Größtwerte in Querrichtung (x-Richtung) des oberen Podestes. Interessant ist ein Vergleich zwischen den Meßstellen 173, 182 und 187 auf der Seite des oberen Podestes, in welche der obere Lauf einbindet, und den Meßstellen 178, 186 und 189 auf der Seite gegenüber, mit zwei freien Rändern. Nach Anlage A18 a) sind die Betonstauchungen an den erstgenannten Meßstellen 173, 182 und 187 deutlich geringer. Gegenüber diesen Meßwerten aus dem oberen Podest mit zwei freien Rändern sind auch die an den Meßstellen des unteren Podestes bestimmten Betonstauchungen von kleinerer Größenordnung.

Die bei einigen Kurvenverläufen in den Anlagen A17 und A18 erkennbaren überproportionalen Stauchungszunahmen weisen auf den Einfluß der Rißbildung hin. Er zeigt sich bei allen Meßstellen frühestens ab einer Gesamtpressenlast von etwa $F = 50,0 \text{ kN}$ bis $F = 60,0 \text{ kN}$. Diese Last entspricht einer gleichmäßigen Flächenlast von $p \approx 7,0 \text{ kN/m}^2$ bis $p \approx 8,5 \text{ kN/m}^2$. Im Hinblick auf die mit $d = 8 \text{ cm}$ geringe Plattendicke der Versuchskörper ist festzustellen, daß diese Last oberhalb der Gebrauchslast vergleichbarer baupraktischer Systeme liegt. Bei einigen Meßstellen deutet die flachere Kurvenneigung bei Belastungsbeginn darauf hin, daß die vorab durchgeführten Belastungszyklen in

diesen Bereichen bereits zur Entstehung erster Risse geführt haben.

Solcherart abgeflachte Kurvenverläufe sind kennzeichnend für die Betonstauchungen in den Anlagen A19 und A20, da vor dem hier dargestellten zweiten Bruchlastzyklus bereits ein weitgehend ausgeprägtes Rißbild vorlag. Daher sind bei diesen Bildern auch die plötzlichen überproportionalen Stauchungszunahmen nur noch in Einzelfällen abgeschwächt zu beobachten. Erkennbar wird jedoch bei Betrachtung des Kurvenverlaufs von Meßstelle 147 in Anlage A20 b), daß die Betonstauchungen an der Plattenoberseite senkrecht zu den Knicklinien etwa die Größenordnung der Meßwerte in den übrigen Bauteilbereichen erreichen können.

4.4 Stahldehnungen

Die an den Versuchskörpern gemessenen Stahldehnungen sind erheblich größer als die Betonstauchungen, da die Tragfähigkeit der hier vorliegenden Querschnitte mit niedrigem Bewehrungsgrad von der Beanspruchung und Ausnutzung des Stahls bestimmt wird. In den Anlagen A21 und A22 sind daher wiederum in den Gebrauchslastzyklen gemessene Werte gegenübergestellt. Die größten Stahldehnungen liegen dabei überwiegend zwischen $\epsilon_s = 0,1 \text{ ‰}$ und $\epsilon_s = 0,2 \text{ ‰}$, also in einer Größenordnung, die etwa der aufnehmbaren Zugdehnung des Betons entspricht. Die Tatsache, daß Stahldehnungen größer $\epsilon = 0,2 \text{ ‰}$ nur in wenigen Ausnahmen gemessen wurden, bestätigt, daß die Vorschädigung der Versuchskörper in diesen Belastungszyklen vor dem jeweiligen Traglastversuch beschränkt werden konnte. Ein Vergleich der Dehnungen in den Anlagen A21 und A22 zeigt einerseits gegenüber den Podesten deutlich größere Meßwerte für die Läufe und andererseits höhere Stahldehnungen in den Feldbereichen als in den Bereichen entlang der Knicklinien.

Im Bruchlastzyklus ändert sich bei Belastung aller Bauteile dieses Verhältnis der Stahldehnungen. Die Anlagen A23 bis A26 veranschaulichen, daß im Traglastversuch höhere Stahldehnungen in den Podesten gemessen werden. Dabei überschreiten die im Bereich des oberen Podestes (Anlagen A25 und A26) ermittelten

Werte bei beiden Versuchen die vergleichbaren Dehnungen des unteren Podestes (Anlagen A23 c und A24 c). Die an den Podesten bei Treppe 1 bestimmten Werte lagen deutlich über den Dehnungen bei Treppe 2. Diese Beobachtung deutet auf die größere Nachgiebigkeit der Stützung hin, die bei Treppe 1 aus der Trennung des oberen Laufs vom unteren Podest gegenüber der monolithischen Ausführung bei Treppe 2 entstand. Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Versuchen ist in Anlage A25 erkennbar. Danach waren bei Treppe 1 die Dehnungen parallel zur Knicklinie größer als am freien Rand, während sich die Größtwerte bei Treppe 2 unmittelbar parallel zum freien Rand ergaben.

Für die Beurteilung der stützenden Faltwerkswirkung sind die Stahldehnungen der oberen senkrecht zu den Knicklinien verlegten Bewehrung von besonderem Interesse, da sie Rückschlüsse auf das in diesem Bereich erwartete Stützmoment erlauben. Das an den Knicklinien bei beiden Versuchen Stahldehnungen gemessen wurden, die auf die Ausprägung eines Stützmomentes hindeuten, zeigen die Anlagen A23 b) und A24 b),d) für die untere Knicklinie sowie Anlage A26 für die obere Knicklinie. Alle Werte liegen jedoch wesentlich unter den Stahldehnungen parallel zu den freien Podesträndern.

Erhebliche Änderungen im Hinblick auf das Trag- und Verformungsverhalten gegenüber dem Bruchlastzyklus 1 lassen die im Bruchlastzyklus 2 gemessenen Stahldehnungen der Bewehrung des unteren Podestes erkennen, die in den Anlagen A27 und A28 aufgetragen wurden. Trotz höherer Flächenlast und Vorschädigung infolge Rißbildung waren die Stahldehnungen im Bruchlastzyklus 2, bei dem jeweils nur das untere Podest und der untere Lauf belastet wurden, deutlich geringer. Die Dehnung der oberen Bewehrung senkrecht zu den Knicklinien erreichte insbesondere entlang der Podestseite, in die der untere Lauf einbindet, an den Meßstellen 45, 47 und 48 etwa die gleiche Größenordnung wie die Werte bei Meßstelle 32 parallel zum freien Rand. Demgegenüber war die Dehnung der unmittelbar an der Knicklinie parallel dazu an der Podestunterseite verlegten Bewehrung sehr viel geringer als die am freien Rand ermittelten vergleichbaren Werte. Die Stahldehnung an der Podestunterseite

in Querrichtung war bei Treppe 1 auch im Bruchlastzyklus 2 wiederum größer als bei Treppe 2.

Bei beiden Versuchskörpern, blieben die Zonen, in denen bis zum Bruch Fließen der Bewehrung ($\varepsilon_s > \approx 2,4 \text{ ‰}$) auftrat, auf vergleichsweise kleine Bereiche beschränkt. Außer an den freien Rändern des oberen Podestes wurde die Fließgrenze der Bewehrung nur noch in Feldmitte des unteren Podestes erreicht.

4.5 Auflagerkräfte

4.5.1 Vertikale Auflagerkräfte

Auch die Verteilung und Größe der Auflagerkräfte ist geeignet, wichtige Hinweise zum Tragverhalten der Versuchskörper zu geben. Die in den Gebrauchslastzyklen aus den Dehnungen der geeichten Auflagerbolzen errechneten Auflagerkräfte sind in den Anlagen A28 bis A31 als Diagramme in Abhängigkeit von der Gesamtbelastung aufgetragen. In den Anlagen A32 und A33 sind darüberhinaus die Auflagerkräfte aus den Bruchlastzyklen dargestellt. Alle Kurvenverläufe sind durch einen nahezu linearen Verlauf gekennzeichnet. Auffallend sind die Unterschiede hinsichtlich der Größe der Auflagerkräfte an den verschiedenen Meßbolzen.

Ausgeglichene Verteilungen mit vergleichsweise geringen Abweichungen entstanden nur in den Gebrauchslastzyklen jeweils bei Belastung der Podeste und für Treppe 1 auch bei Belastung von oberem Lauf und Podest an den Auflagermeßpunkten des unteren Podests. Alle anderen Belastungszyklen waren durch ausgeprägte Auflagerkraftspitzen gekennzeichnet, die immer an solchen Punkten gemessen wurden, die in Verlängerung der Knicklinien des Systems angeordnet waren. Dabei waren die Auflagerkräfte an den Punkten V41 und V65 (siehe Anlage A7) am größten. Auffallend ist, daß an beide Meßstellen unmittelbar ein nach unten abgewinkelter Lauf angrenzt.

Für das obere Podest erklärt sich diese Beobachtung daraus, daß auf der Gegenseite kein Lauf einbindet und dort zwei freie Ränder an die Auflagerlinie anschließen. Die geringen Kräfte

in den Meßbolzen V51, V61 und V63 waren daher hier zu erwarten. Am unteren Podest hätten demgegenüber an beiden Auflagerlinien im Bereich der Knicklinie Auflagerkraftspitzen entstehen müssen. Die geringe Erhöhung bei V45 unmittelbar neben dem hier angrenzenden oberen Lauf ist im Vergleich zum gegenüberliegenden Meßpunkt V41 wohl damit zu erklären, daß an dieser Knicklinie bei den Versuchskörpern auch in der Mitte um das Treppenauge ein wenig nachgiebiger Bereich vorlag. Er entstand gegenüber der meßtechnisch bedingten Nachgiebigkeit des Auflagerbolzens V45 aus der starren Auflagerung am Fußpunkt des unteren Laufes, so daß die Nachgiebigkeit des unteren Podestes am Treppenauge entscheidend durch die auch im Zustand 2 noch vergleichsweise hohe Dehnsteifigkeit des unteren Laufes bestimmt wurde. In Bild 32 ist der Anteil der Auflagerkraft am Fußpunkt des unteren Laufes an der Gesamtlast aufgetragen. Seine Größe deutet darauf hin, daß Lastanteile aus den oberen Bereichen der Versuchskörper, insbesondere bei Treppe 2 auch über den unteren Lauf abgetragen wurden. Darüberhinaus läßt die Auflagerkraftverteilung erkennen, daß trotz der Rißbildung in den Läufen bis unmittelbar zum Bruch erhebliche Lastanteile über Zugbeanspruchung der Läufe an höher gelegenen Auflagerlinien aufgehängt wurden.

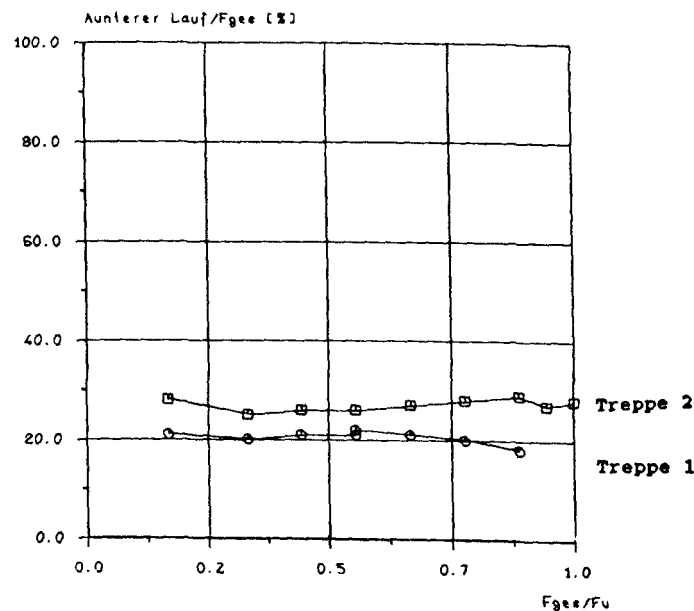


Bild 32: Anteil der Auflagerkraft am Fußpunkt des unteren Laufes an der Gesamtlast

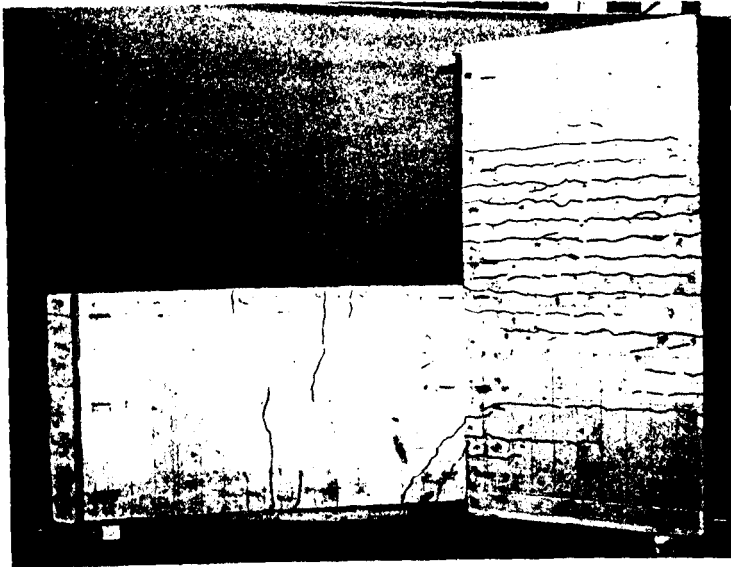
4.5.2 Horizontale Auflagerkräfte

Die belastungsabhängige Darstellung der horizontalen Auflagerkräfte enthalten die Anlagen A34 bis A39. Mit der Druckkraft in Festhaltung H81 am Fußpunkt des oberen Laufes bei Treppe 1 und der Zugbeanspruchung aller anderen Festhaltungen bestätigen die Versuchsergebnisse die vorher angenommene Verteilung der Horizontalkräfte. Abgesehen von einigen unregelmäßigen Tendenzen bei Belastungsbeginn und begrenzten geringeren Zwischenstörungen weisen alle Kurven überwiegend einen angenähert linearen Verlauf auf. Eine ausgeprägte Abweichung von der Linearität ist im Bruchlastzyklus 1 für die Festhaltungen H71, H81 und H83 des unteren Podestes etwa ab einem Verhältnis $F/F_U = 0,75$ zu erkennen (siehe Anlage A38). Hier deutet sich bereits das Versagen der Festhaltung H83 an, das letztlich bei diesem Lastzyklus maßgebend für die Entstehung des Bruches war. Für den Bruchlastzyklus 2 sind keine Kurvenverläufe angegeben, da die nach dem Bruchlastzyklus 1 vorgenommenen Verstärkungen keine zuverlässigen Messungen mehr zuließen.

Ein Vergleich der Kurvenverläufe in den Anlagen A34 bis A39 zeigt insofern Übereinstimmungen zwischen allen untersuchten Belastungsvarianten, als am unteren Podest immer an der Festhaltung H83 die größte horizontale Zugkraft gemessen wurde. Auch am oberen Podest wurde die größte Kraft immer an einer Meßstelle, der Festhaltung H77, ermittelt. Im Gebrauchslastzyklus, bei Belastung des oberen Laufs und Podestes, ergaben sich an beiden Festhaltungen H77 und H83 horizontale Zugkräfte ähnlicher Größe zu etwa 10 % der Gesamtpressenlast F . Bei gemeinsamer Belastung aller Bauteile wurde dann die Horizontalkraft an der Festhaltung H83 des unteren Podestes deutlich größer als an der Festhaltung H77. Sie erreichte jetzt bei Treppe 2 eine Größenordnung von etwa 25 % der Gesamtpressenlast F .

4.6 Rißentwicklung und Rißbreiten

Die Rißbreite wurde in den Versuchen jeweils nach den in Anlage A8 und A9 benannten Laststufen an festgelegten Punkten gemessen, die mit Hilfe kleiner kreisförmiger, fortlaufend numerierter Aufkleber markiert waren. Dabei wurde auch die Rißentwicklung durch Nachziehen der Risse mit verschiedenen Farben und Symbolen festgehalten. Die so gekennzeichneten Risse wurden von den Versuchskörpern in Skizzen übertragen. Sie sind in den Anlagen A40 bis A43 zusammengestellt und verdeutlichen die Rißentwicklung bis zum Bruch. Nach Abschluß der Versuchsdurchführung wurden alle Risse mit einem schwarzen Filzstift nachgezeichnet und dadurch hervorgehoben. Das so sichtbar gemachte Rißbild zeigen die nachfolgenden Bilder an den Unterseiten der Versuchskörper.



oberer Abschnitt



unterer Abschnitt

Bild 33: Rißbild nach dem Bruch an der Unterseite von Treppe 1

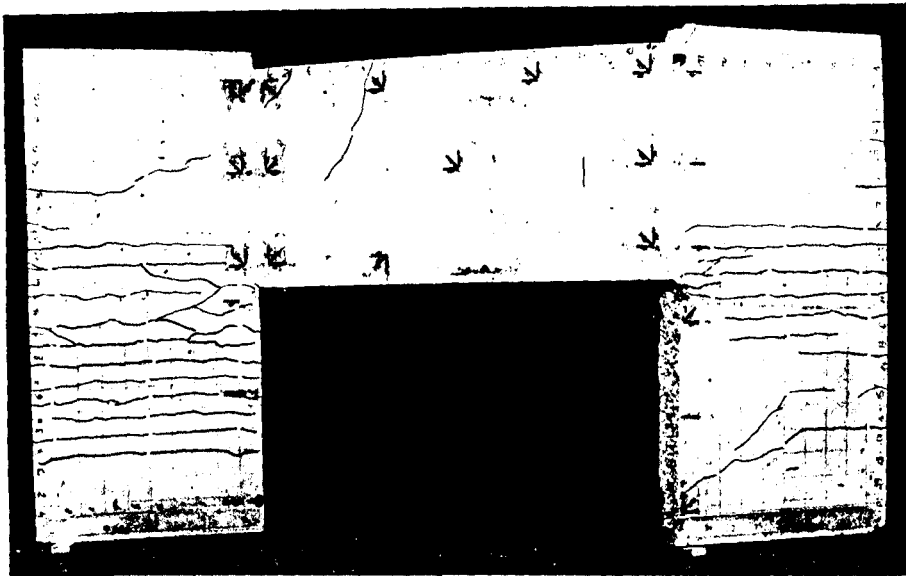
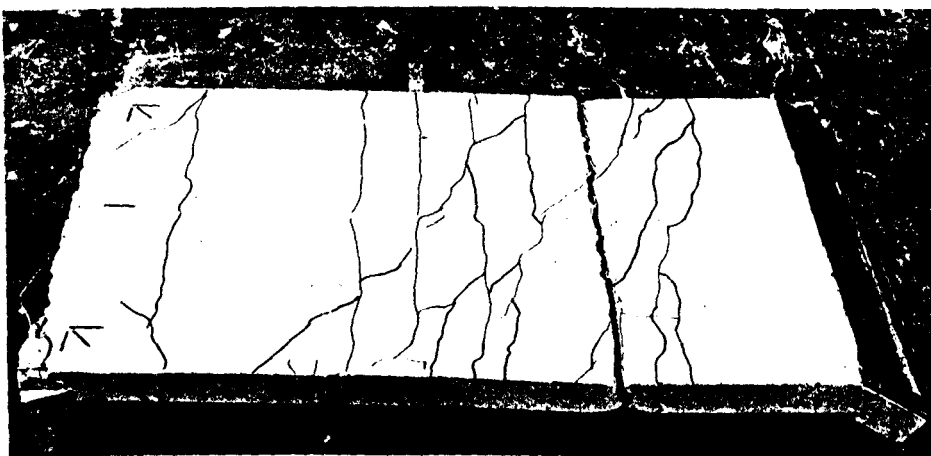
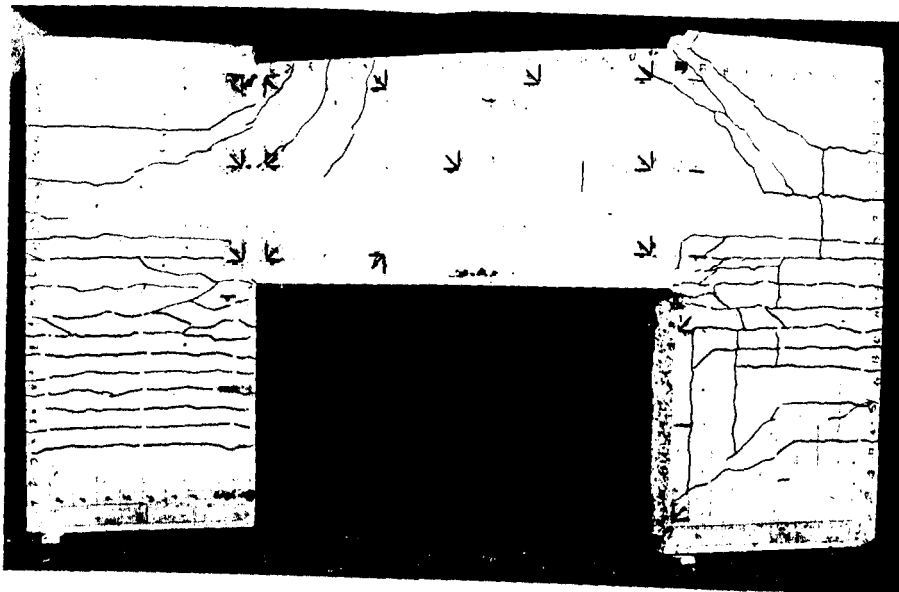


Bild 34: Reißbild unmittelbar vor dem Bruch an der Unterseite von Treppe 2



unterer
Lauf

Bild 35: Reißbilder nach Beendigung des Versuchs an der Unterseite von Treppe 2.

Ein Vergleich der Rißbilder läßt zwischen beiden Versuchen weitreichende Übereinstimmungen erkennen, die hier zunächst kurz beschrieben werden. Beide Podeste wiesen jeweils an der Unterseite ein deutlich ausgeprägteres Rißbild auf als die Läufe. Dabei zeigte der untere Lauf noch eine stärkere Rißbildung als der obere Lauf, bei dem nur wenige Einzelrisse entstanden. Alle Risse an der Unterseite verliefen nahezu geradlinig und senkrecht zur unteren Hauptzugbewehrung des jeweiligen Bauteils. Die Anlagen A40 und A42 bestätigen, daß die Entstehung der schrägen Risse im unteren Lauf unmittelbar auf das Versagen der Versuchskörper zurückgeführt werden kann.

Betrachtet man an den Versuchskörpern die Rißbilder beider Podeste, so ist bei Treppe 1 zwischen dem oberen und unteren Podest eine weitgehende Übereinstimmung erkennbar, wenn man dabei die Risse aus dem Bruchlastzyklus 2 unberücksichtigt läßt, die am oberen Podest natürlich fehlen. Auffällig ist bei beiden Podesten eine Verschiebung des Rißzentrums aus der Podestmitte in den Bereich mit zwei gegenüberliegenden freien Rändern. Etwa in der Mitte des nach unten abgewinkelten Laufes ist bei Treppe 1 ein Riß senkrecht zur Knicklinie vorhanden, der erst unter hohen Lasten entstand und im Lauf schräg nach unten zum äußeren Rand weiterläuft. Dieser Riß war auch bei Treppe 2 in beiden Podesten entstanden. Die Last zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Risse entsprach dabei in etwa der Last bei Treppe 1. Sie betrug für den Riß im oberen Podest $p = 12 \text{ kN/m}^2$ und für den Riß im unteren Podest $p = 17 \text{ kN/m}^2$ bei Annahme einer gleichmäßigen Flächenlast.

Beide Versuchskörper zeigen darüberhinaus auch für den restlichen Bereich des oberen Podestes und den oberen Lauf nahezu identische Rißverläufe (siehe Bilder 33 und 34). Abweichungen sind lediglich am unteren Lauf und Podest erkennbar. Am unteren Podest sind bei Treppe 2 deutlich weniger Risse entstanden als bei Treppe 1 und das Zentrum des Rißbildes liegt hier ziemlich genau in der Podestmitte. Die Rißbildung des unteren Laufs unterscheidet sich insofern als bei Treppe 1 fast alle Risse die Lauflinie schräg schneiden, während die Risse bei Treppe 2 überwiegend senkrecht zu dieser Linie verlaufen. Die Anlagen A40 und A42 zeigen jedoch, daß die Schrägrißbildung im unteren Lauf bei beiden Versuchen entweder unmittelbar beim

Versagen oder kurz vorher entstand. An der gesamten Oberfläche waren bei beiden Versuchskörpern nur wenige Einzelrisse zu beobachten. Sie traten im Bereich der Knicklinien vorwiegend in der Nähe von horizontalen Festhaltungen auf.

Die aus den Rißbildern abzuleitenden Hinweise und Tendenzen werden auch durch die Ergebnisse der in den Anlagen A44 und A45 zusammengestellten Rißbreitenmessungen bestätigt. Die mittleren Rißbreiten w_m aller Meßpunkte des jeweiligen Bauteils sind für eine Belastung entsprechend $p \approx 17,0 \text{ kN/m}^2$, in Tabelle 4 zusammengestellt. Dabei wurden zwar nicht alle Risse systematisch erfaßt. Die gezielte Auswahl charakteristischer Meßpunkte bei der Versuchsdurchführung erlaubt jedoch die Ableitung qualitativer Aussagen. Hierzu seien die wichtigsten Feststellungen nachfolgend angegeben:

- Die mittleren Rißbreiten w_m waren bei Treppe 2 etwas geringer als bei Treppe 1
- Die Risse besaßen bei beiden Versuchskörpern am oberen Podest eine größere Breite. Dieser Unterschied war bei Treppe 2 ausgeprägter. Hier war die mittlere Rißbreite w_m deutlich kleiner als am oberen Podest und den Podesten von Treppe 1.
- An den Knicklinien erreichten die Risse an der Oberseite vergleichsweise große Breiten. Ein besonders hoher Wert wurde mit $w_m = 0,86 \text{ mm}$ am oberen Lauf bei Treppe 2 gemessen. Hier war der Querschnitt auf ganzer Höhe durchgerissen

Bauteil	Treppe 1		Treppe 2	
	n	w_m [mm]	n	w_m [mm]
oberes Podest	19	0,28	24	0,26
oberer Lauf	3	0,44	1	0,26
unteres Podest	15	0,25	15	0,16
unterer Lauf	-	-	5	0,19

n: Anzahl der Rißbreitenmeßpunkte, w_m : mittlere Rißbreite

Tabelle 4: mittlere Rißbreiten w_m an den im Versuch erfaßten Meßpunkten für $p \approx 17,00 \text{ kN/m}^2$

4.7 Versagenszustand der Versuchskörper

Die Tragfähigkeit eines Stahlbetonquerschnittes ist erschöpft, wenn entweder der Stahl in der Zugzone oder der Beton in der Druckzone versagt. Welche Komponente letztlich maßgebend für das Versagen ist, wird vor allem von der Querschnittsausbildung bestimmt. Daneben hat jedoch auch die Festlegung der im Bruchzustand zulässigen Grenzdehnungen ϵ_{su} und ϵ_{bu} entscheidenden Einfluß. Allgemein ist dazu für den charakteristischen "balance point" anzumerken, daß bei konstanter Betonstauchung ϵ_{bu} und zunehmender zulässiger Stahlbruchdehnung ϵ_{su} der Bewehrungsgrad sinkt, bei dem Stahl und Beton in biegebeanspruchten Querschnitten gerade gleichzeitig versagen. Bei den hier vorliegenden schwach bewehrten Querschnitten (siehe Abschnitt 3.2.1) mußte jedoch immer ein Versagen auf der Zugseite erwartet werden.

Unter Vernachlässigung weiterer Spannungssteigerungen ist im Stahl die Tragfähigkeit an der Streckgrenze erreicht. Der Bruch des Stahlbetonquerschnittes tritt ein, weil die Biegezugbewehrung durchreißt oder weil die Betondruckzone wegen Ausdehnung der Zugzone zu stark eingeschnürt wird. Nach DIN 1045 /33/ gilt die Annahme, daß der Bruch durch Erreichen der Stahldehnung $\epsilon_{su} = 5 \text{ ‰}$ gekennzeichnet ist.

In beiden Versuchen zu dieser Arbeit war das Versagen im Bruchlastzyklus 1, bei Belastung aller Bauteile bedingt durch das Versagen der horizontalen Festhaltung H83 an der Knicklinie des unteren Podestes. Dieser Ausfall der Festhaltung entstand bei Treppe 1 langsamer und kündigte sich hier bereits vorher an (siehe Anlage A38), während bei Treppe 2 eine plötzliche Betonabplatzung eintrat (siehe Bild 36). Die Anlagen A61 und A62 zeigen jedoch, daß zu diesem Zeitpunkt am oberen Podest von Treppe 1 an den Meßstellen 76 und 88 auch die Grenzdehnung $\epsilon_{su} = 5 \text{ ‰}$ überschritten war. Auch am oberen Podest von Treppe 2 wurden mit den StahldMS 86, 88 und 89 unmittelbar vor dem Versagen der horizontalen Festhaltung H83 Dehnungen $\epsilon_s > 3,0 \text{ ‰}$ gemessen. Die erreichten Lasten im Bruchlastzyklus 1 können somit als Traglast für das obere Podest angesehen werden.

Unterschiede hinsichtlich des Bruchbildes ergaben sich zwischen den Versuchskörpern jeweils im Bruchlastzyklus 2. Bei Treppe 1 entstand der Bruch schlagartig senkrecht zur Knicklinie (siehe Anlage A40) im unteren Podest und im Bereich um die horizontalen Festhaltungen H73 und H75. Ansichten der Bruchstellen von Treppe 1 zeigen die Bilder 36 und 37. Auch wenn der Bruch schlagartig erfolgte und keine detaillierte Beobachtung möglich war, so kann aus der Rißentwicklung doch eindeutig darauf geschlossen werden, daß das Versagen im Bruchlastzyklus 2 bei Treppe 1 zunächst von Betonabplatzungen um die horizontalen Festhaltungen H73 und H75 ausging, da die vor dem Bruch in diesem Bereich beobachteten schrägen Risse (siehe Anlage A41) eine große Rißbreite aufwiesen.

Bei Treppe 2 waren bereits im Bruchlastzyklus 1 Betonabplatzungen an der Festhaltung H83 aufgetreten. Die Festhaltung in y-Richtung wurde daher an diesem Versuchskörper durch eine Abstützung zu den Auflagerrahmen vor dem Bruchlastzyklus 2 so verstärkt, daß das Versagen einer horizontalen Festhaltung sicher ausgeschlossen werden konnte. Als Folge dieser Verstärkung trat der Bruch jetzt nicht mehr im Podest ein, sondern entstand im unteren Lauf schlagartig entlang der Knicklinie und parallel dazu im Feldbereich des Laufes. Die genaue Lage der Bruchlinien zeigen die Anlagen A42 und A43, sowie Bild 35. Die Meßwerte der Stahl-DMS in Anlage A68 belegen, daß die größten Stahldehnungen im Feldbereich an den Meßstellen S70 und S71 auftraten. Das Versagen ging danach bei Treppe 2 im Bruchlastzyklus 2 zuerst von der unteren Bruchlinie im Feldbereich des unteren Laufes aus.

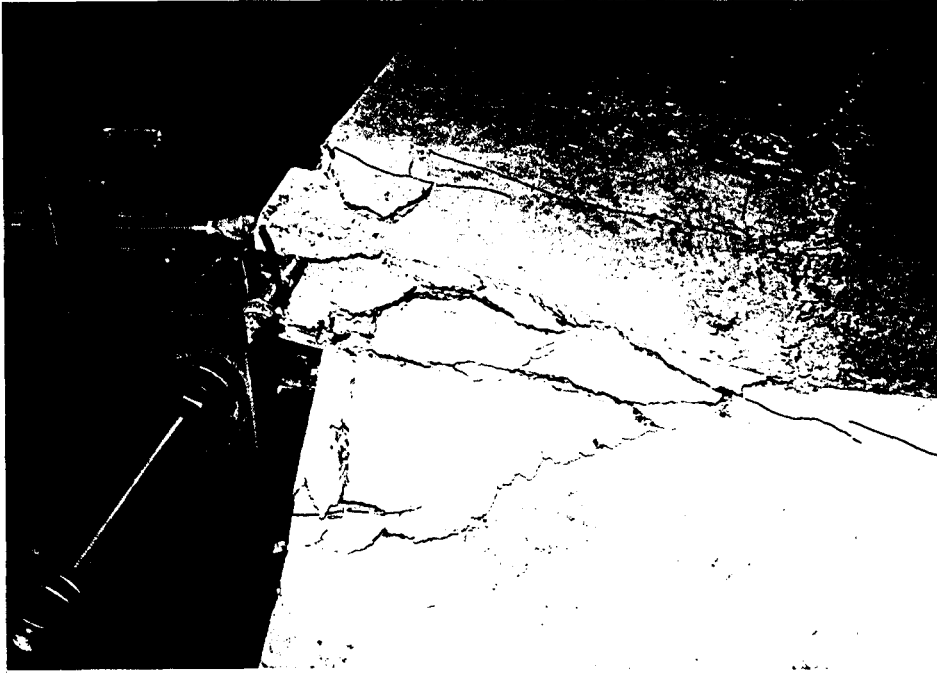


Bild 36: Betonabplatzungen an den horizontalen Festhaltungen H73 und H75 bei Treppe 1 nach Bruchlastzyklus 2



Bild 37: Ansicht der Bruchlinie des unteren Podestes von Treppe 1 nach Bruchlastzyklus 2

4.8 Zeitabhängiges Verhalten der Versuchskörper

Die zeitabhängigen Änderungen des Verhaltens von Stahlbetonbauteilen entstehen durch das Schwinden und Kriechen des Betons. Bei den zu dieser Arbeit durchgeführten Versuchen mußte die Standzeit der Dauerlast jeweils auf einen kurzen Zeitraum von 93 Stunden bei Treppe 1 und 50 Stunden bei Treppe 2 (siehe Abschnitt 3.5) beschränkt bleiben, um den Versuchsaufwand zu begrenzen. Diese Zeitabschnitte zeigen nur einen sehr kleinen Ausschnitt des Kriechverlaufs, der sich bei Beton bekanntermaßen über sehr viel längere Zeiträume erstreckt. Trotzdem erlauben die Messungen unter Dauerlast Rückschlüsse auf zeitabhängige Veränderungen, da die gewählte Dauerlast, die mit $F_{\text{ges.}} = 42,0 \text{ kN}$ in etwa einer Flächenlast von $p = 6,0 \text{ kN/m}^2$ entsprach, im Hinblick auf die geringe Plattendicke der Versuchskörper von $d = 8 \text{ cm}$ sicher weit über Gebrauchslasten lag, die dem Verkleinerungsmaßstab der Versuchskörper entsprechen. Schon im Verlauf des kurzen Beobachtungszeitraums konnten daher deutliche Veränderungen aufgezeigt werden.

Dazu ist die zeitabhängige Zunahme der Durchbiegung in den Bildern 38 bis 40 aufgetragen. Bezieht man die dargestellten Werte auf den Ausgangswert, der unmittelbar nach dem Aufbringen ($\approx 1 \text{ min.}$) der Dauerlast gemessen wurde, so zeigt sich für Treppe 1 eine größere Durchbiegungszunahme als für Treppe 2. Trotz der ohnehin größeren Durchbiegung ist bei beiden Versuchen darüberhinaus für das obere Podest eine deutlichere Durchbiegungszunahme zu erkennen. Bild 40 verdeutlicht jedoch, daß eine grundlegende Änderung des Verlaufs der Biegelinie infolge der zeitabhängigen Einflüsse nicht zu erwarten ist. Der Kriecheinfluß führte - wiederum bezogen auf die Ausgangswerte - zu annähernd gleicher Vergrößerung der Durchbiegung an den Meßstellen eines Bauteils.

Dabei bleibt der günstige Einfluß der Stützung durch die Läufe allerdings erhalten. Er ist bei dem bereits angesprochenen Vergleich der Formänderungen des unteren Podestes mit denen des oberen Podestes sowie bei einem Vergleich der Ver-

suchskörper untereinander erkennbar. Podeste in die zwei Läufe einbinden (Treppe 2 unteres Podest), oder bei denen der stützende Lauf am Fußpunkt starrer gelagert ist (Treppe 1 unteres Podest) weisen geringere Verformungen auf.

Kriechen vergrößert in biegebeanspruchten Querschnitten die Stauchung der Biegedruckzone. Sowohl im Zustand 1 als auch im Zustand 2 folgt daraus auch eine Vergrößerung der Stahldehnungen ϵ_s , die in gerissenen Querschnitten vergleichsweise gering ausfällt, da sie sich hier nur aus der Verringerung des Hebelarms der inneren Kräfte ergibt. In Bild 41 wurde trotzdem die Veränderung der Stahldehnung ϵ_s für charakteristische Meßstellen aufgetragen. Bei den vorliegenden niedrig bewehrten Querschnitten erreicht die Stahldehnung bereits unter niedrigen Lasten höhere Werte, die Unterschiede und Veränderungen so eher erkennen lassen als die Betonstauchungen (siehe hierzu auch Abschnitt 4.4). Ein Vergleich der Stahldehnungsverläufe in Bild 41 bestätigt die bereits aus den Durchbiegungsmessungen abgeleiteten Aussagen. Auch hier ist wiederum eine größere Dehnungszunahme bei den Meßstellen von Versuchskörper Treppe 1 festzustellen. Größere Unterschiede zwischen einzelnen Meßstellen (DMS 44 und DMS 88) sind dabei auf den Einfluß der Rißbildung zurückzuführen, der eine Abhängigkeit der mit einem DMS gemessenen Stahldehnungen zum Abstand der benachbarten Risse herstellt.

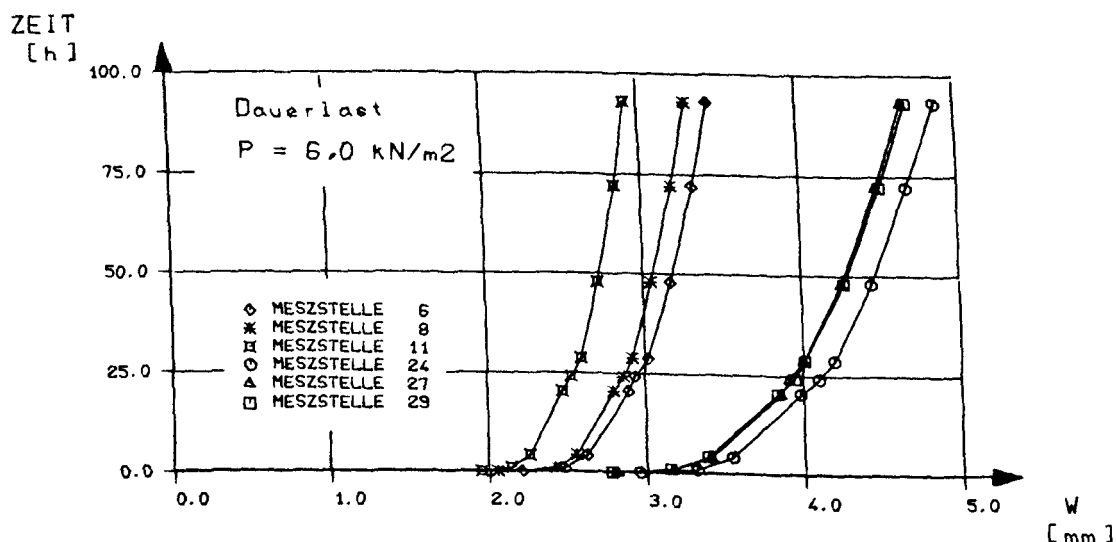


Bild 38: Zeitabhängige Durchbiegungsänderung der Podeste bei VK Treppe 1

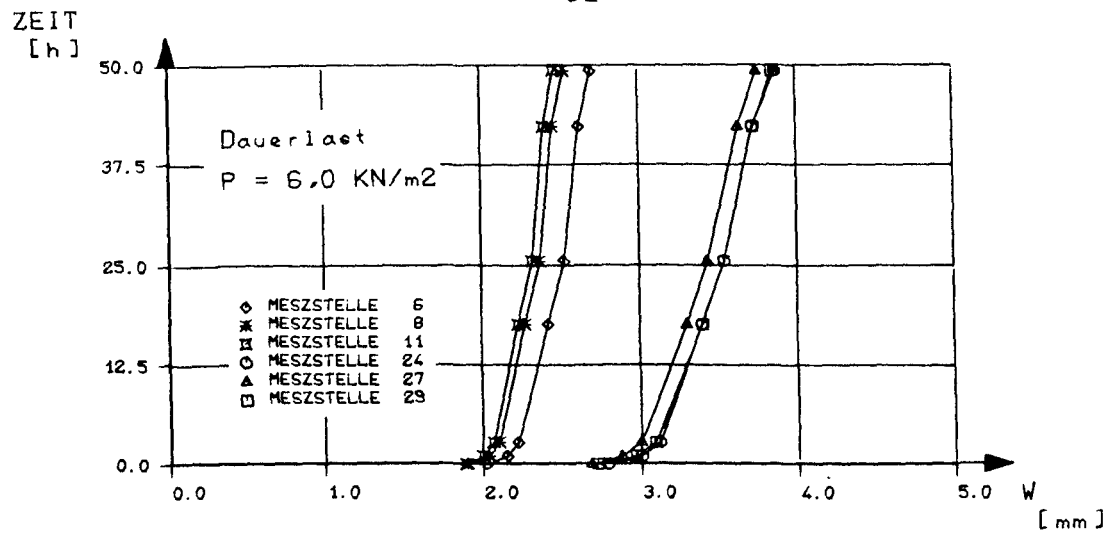


Bild 39: Zeitabhängige Durchbiegungsänderung der Podeste bei VK Treppe 2

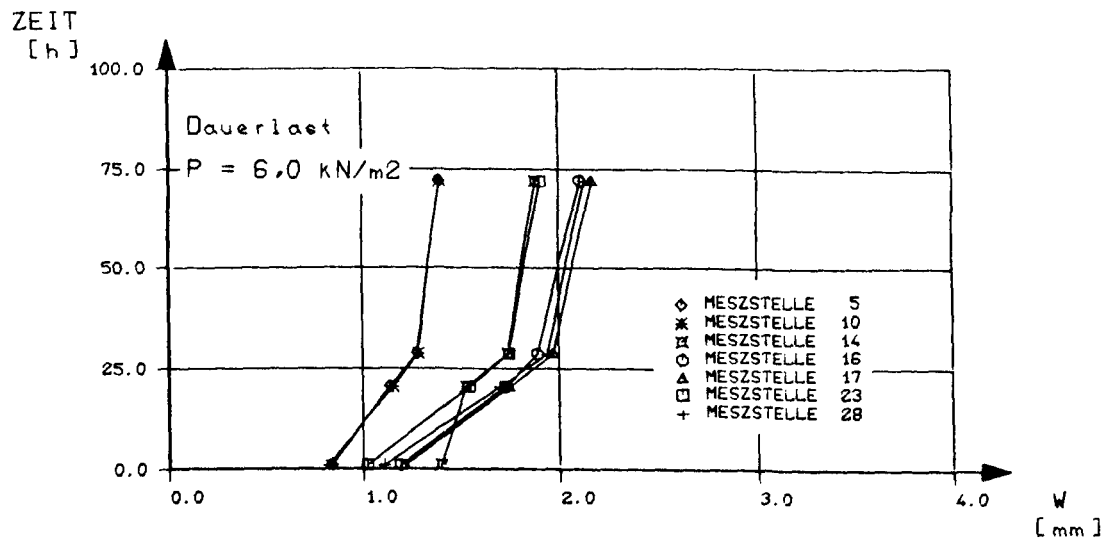


Bild 40: Zeitabhängige Zunahme der Durchbiegung im Längsschnitt von VK Treppe 2

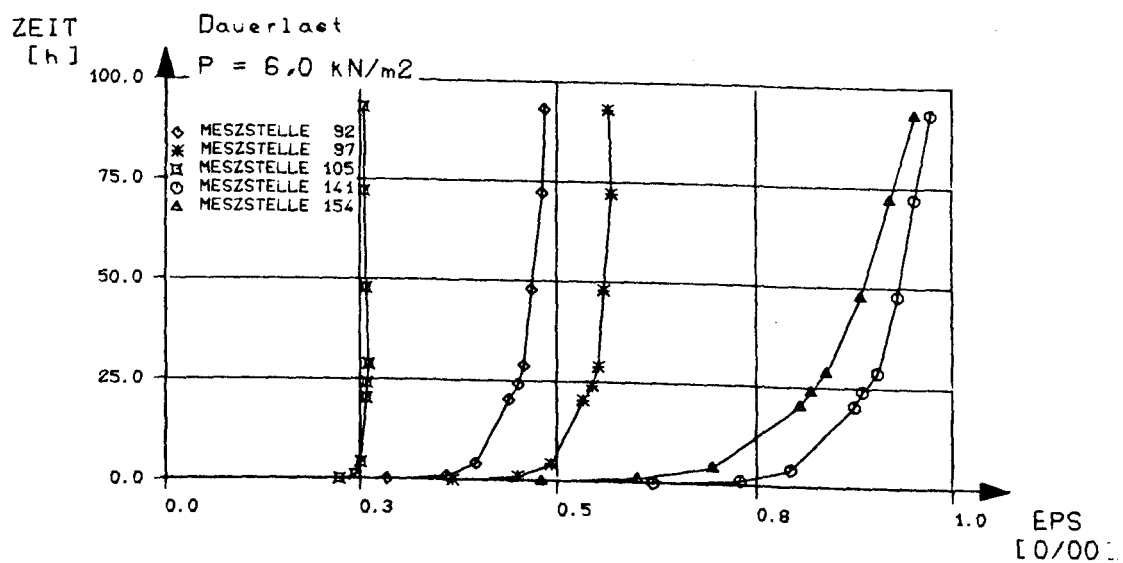


Bild 41: Zeitabhängige Änderung der Stahldehnungen an charakteristischen Meßstellen der Podeste

5 Bewertung der Versuchsergebnisse

5.1 Allgemeines

Die zu dieser Forschungsarbeit durchgeführten Versuche sollten vor allem den günstigen Einfluß der Faltwerkwirkung auf das Tragverhalten der untersuchten Treppensysteme aufzeigen. Im vorliegenden Abschnitt werden daher die vorab dargestellten Versuchsergebnisse im Hinblick auf diese Zielsetzung ausgewertet. Dabei wird die durch das Meßprogramm vorgegebene Unterteilung der Versuchsbeobachtung nachfolgend auch für die Ableitung der hier interessierenden Aussagen und Hinweise beibehalten.

5.2 Formänderungsverhalten

Traglastversuche sind für die Erfassung des Formänderungsverhaltens, das hier durch Messung der Durchbiegung charakteristischer Punkte ermittelt wurde, besonders bedeutungsvoll, da die Durchbiegungen von zahlreichen Einflüssen bestimmt werden und neben den geometrischen Größen (Querschnittsabmessungen, Lage der Bewehrung) und dem statischen System (Auflagerung und Einspannungsgrad der Podeste, Stützweiten) auch noch entscheidend von den Materialeigenschaften (Elastizitätsmodul von Beton und Stahl, Verbundfestigkeit zwischen Beton und Stahl, Größe und Verlauf von Kriechen und Schwinden des Betons) abhängen. Die gemeinsame Erfassung aller Einflüsse ist in einer Berechnung daher nur mit Näherungsansätzen möglich. Die hier aus den Durchbiegungsmessungen abzuleitenden Rückschlüsse auf die Faltwerkwirkung seien nachfolgend erläutert:

- Die Durchbiegungen des oberen Podestes lagen bei beiden Versuchen deutlich über denen des unteren Podestes. Nach den derzeit in der Baupraxis gebräuchlichen Näherungsverfahren ohne Berücksichtigung der Faltwerkwirkung (siehe Abschnitt 2) müßte die Durchbiegung des unteren Podestes jedoch erheblich größer sein, da dann entlang der gesamten Knicklinie eine Beanspruchung aus der Linienlast infolge Auflagerung der Läufe vorliegt (siehe Bild 6). Eine verrin-

gerte Durchbiegung muß nicht zwangsläufig auf den Einfluß einer Stützung hindeuten. Sie kann auch infolge erhöhter Biegesteifigkeit entstehen, die sich an den Knicklinien z.B. aus einer Mitwirkung der abgewinkelten Läufe ergeben kann.

Hierzu belegen jedoch die Meßergebnisse des Versuchskörpers Treppe 1, bei dem beide Podeste nur mit jeweils einem Lauf monolithisch verbunden waren, daß unterschiedliche Biegesteifigkeiten nicht für die geringere Durchbiegung des unteren Podestes verantwortlich waren. Tatsächlich ist die Durchbiegungsdifferenz zwischen den Podesten ein Indiz dafür, daß die starre Linienlagerung des unteren Laufes und bei Treppe 2 darüberhinaus die Einbindung des oberen Laufes eine unnachgiebigere Stützung des unteren Podestes an der Knicklinie gegenüber dem oberen Podest bewirkten.

- Die Durchbiegung der Podeste war an den freien Rändern im Bruchlastzyklus 1 etwa genau so groß wie an den Knicklinien. Hierbei hat die vorwiegend meßtechnisch bedingte Nachgiebigkeit der horizontalen Festhaltungen sicher eine entscheidende Rolle gespielt, denn nach der Verstärkung dieser Festhaltungen wurden im Bruchlastzyklus 2 in beiden Versuchen am freien Rand des unteren Podestes größere Durchbiegungen als an der Knicklinie gemessen. Die Ableitung der Lasten aus den Läufen bewirkte also keine Durchbiegungszunahme an den Knicklinien.
- Die Laufdurchbiegungen waren in den Feldmitten größer als an den Knicklinien. Die Mittendurchbiegung des zweifach eingespannten oberen Laufes bei Treppe 2 war nach Abzug der Durchbiegungsanteile an den Knicklinien deutlich geringer als die Durchbiegung der anderen jeweils nur einseitig eingespannten Läufe.
- Die Durchbiegungen waren im Bruchlastzyklus 2 trotz höherer Flächenlast jeweils geringer als bei den vorangegangenen Belastungen. Auch diese Beobachtung weist auf den stützenden Einfluß sehr starrer horizontaler Festhaltungen hin.

5.3 Dehnungsmessungen

In Abschnitt 3.4 wurde zur gewählten Anordnung der Dehnmeßstreifen bereits ausgeführt, daß dabei die erwartete Faltwerkswirkung berücksichtigt worden war. Für die Plattentragwirkung des Treppensystems, die mit der paarweise gegenüberliegenden Anordnung der Stahl- und Beton- DMS besonders gut erfaßt werden konnte, ergibt sich infolge der Faltwerkswirkung vor allem eine Stützung entlang der Knicklinien, so daß sich senkrecht hierzu negative Biegemomente ausbilden, die an den Plattenoberseiten Zug erzeugen. Die Anlagen A5 und A6 bestätigen, daß die Lage der DMS diesem Verlauf der Biegemomente angepaßt war. Allein die Tatsache, daß mit den Stahl-DMS fast ausschließlich Dehnungen und mit den Beton-DMS vorwiegend Stauchungen gemessen wurden, ist daher als wichtiger Hinweis für die zutreffende Einschätzung des Tragverhaltens anzusehen.

Darüberhinaus beeinflussen die Stützmomente entlang der Knicklinien aber auch die Momentenverteilung der angrenzenden Bauteile. Die Lage der DMS mit den größten Meßwerten und das Verhältnis der Dehnungen untereinander sind danach ebenfalls geeignet, Aufschluß über den Einfluß der Faltwerkswirkung zu geben. Insbesondere die Größe der Dehnungen an den Knicklinien ist dafür im Vergleich zu den Werten an den freien Rändern von Interesse. Die Beobachtung, daß im Bruchlastzyklus 1 bei beiden Versuchen senkrecht zu den Knicklinien ausgeprägte Dehnungen gemessen wurden, die im Bruchlastzyklus 2 noch bis zu einer Größenordnung anstiegen, die etwa den Meßwerten an den freien Rändern entsprach, bestätigt den schon mit den Durchbiegungsmessungen gewonnenen Hinweis zum Einfluß der horizontal starren Lagerung der Podestplatten.

Dagegen ist der Einfluß der Scheibenbeanspruchung auf die Dehnungsverteilung vergleichsweise gering. Ein Vergleich der Meßwerte in den Läufen, die den größten Anteil der Stützkkräfte aufnehmen, mit den Werten für die Podeste zeigt keine signifikant höheren Betonstauchungen.

5.4 Vertikale und horizontale Auflagerkräfte

Eine Interpretation der Ergebnisse aus den Auflagerkraftmessungen wurde bereits im Abschnitt 4.5.1 vorgenommen. Insbesondere auf den Einfluß, der sich aus den für die Versuchskörper typischen Nachgiebigkeitsunterschieden hinsichtlich der Verteilung der Auflagerkräfte ergab, wurde dabei hingewiesen. In dem hier interessierenden Zusammenhang deutet vor allem die Konzentration der vertikalen Auflagerkraft auf den Einfluß der Scheibenbeanspruchung infolge Faltwerkwirkung hin. Diese Scheibenbeanspruchung kann in den Läufen sowohl aus stützenden Druckkräften für ein über dem Lauf angeordnetes Podest als auch aus Zugkräften infolge Aufhängung eines darunter angeordneten Podestes entstehen.

Die Kräfte, die aus den Dehnungen der horizontalen Festhaltungen errechnet wurden, können allein durch die Größe, in der sie sich bei beiden Versuchen ergaben als eindeutiger Beleg für die Ausprägung der Faltwerkwirkung angesehen werden. In Plattentragwerken können horizontale Auflagerkräfte nur aus der Membranwirkung bei großen Verformungen entstehen. An den Versuchskörpern wurden jedoch auch schon in den Gebrauchslastzyklen bei kleinen Verformungen horizontale Auflagerkräfte gemessen. Die Ausbildung eines Membranspannungszustandes war allenfalls eingeschränkt möglich, da die Festhaltungen jeweils nur einseitig an den Podesten angeordnet waren (siehe Anlage A7).

Die Lage der am höchsten beanspruchten Festhaltungen H75 und H83 weist eindeutig darauf hin, daß sich die stützenden Spreng- und Hängewerke innerhalb des Treppensystems vorwiegend in Y-Richtung (Laufrichtung der Läufe) ausbilden. Eine Abweichung gegenüber baupraktischen Lösungen, bei denen die Auflagerlinien in der Regel auf gesamter Länge unverschieblich gehalten werden und so eine Ableitung der Scheibenkräfte in den Podesten über Druckstreben ermöglichen, bestand bei den Versuchskörpern insofern als die Scheibenbeanspruchung in den Podesten über Zugkräfte zu den Festhaltungen abgetragen werden mußte. Eine schematische Darstellung hierzu enthält Bild 42.

Auf die große Bedeutung der horizontalen Festhaltungen wurde bereits bei der Beschreibung des Versagenszustandes und der Interpretation der Durchbiegungs- und Dehnungsmessungen hingewiesen. Sie zeigte sich an den Versuchsergebnissen auch in den Unterschieden zwischen den Bruchlastzyklen der Versuche, da die horizontalen Festhaltungen am unteren Podest jeweils vor Beginn des Bruchlastzyklus 2 verstärkt worden waren. An dem einfachen System in Bild 12 a) läßt sich die Bedeutung des Einflusses der horizontalen Festhaltung leicht aufzeigen.

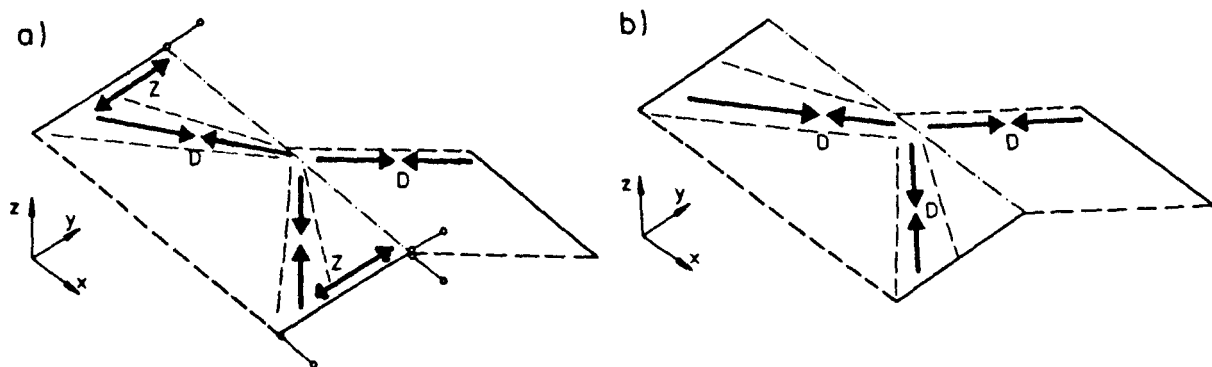


Bild 42: Ausbildung eines Sprengwerks bei einem System
a) entsprechend dem unteren Abschnitt von Treppe 1
b) mit unverschieblichen Auflagerlinien.

5.5 Rißverhalten

Der Rißverlauf der untersuchten Treppensysteme wird gemeinsam durch die Plattentragwirkung und die Scheibenspannungen parallel zu den Mittelebenen bestimmt. Im Gegensatz zu den Dehnungsmessungen, die den Einfluß der Scheibenbeanspruchung nicht unmittelbar erkennbar werden ließen, können aus den Rißbildern der Versuchskörper Hinweise darauf abgeleitet werden. So kann z.B. die verminderte Rißbildung in den Feldmitten der Läufe gegenüber der Rißbildung in den Podesten auf den Einfluß der Druckspannungen, die infolge von Stützkraften in den Plattenebenen entstehen zurückgeführt werden. Demgegenüber zeigt das Rißbild der Podeste, daß den Scheibenbeanspruchungen hier kein bedeutender Anteil an den Rißbildungen

zugewiesen werden kann. Der für die Scheibenspannungen in den Podesten zwischen den Knicklinien und den freien Rändern anzunehmende Gradient hätte sonst eine Änderung des Rißabstandes bewirkt und damit auch zu Abweichungen gegenüber den ausgeprägt parallelen Rißverläufen geführt.

Neben Hinweisen zur Abschätzung der Scheibenbeanspruchung liefert das Rißbild der Podeste Merkmale zur Auflagerung, die bei Ausnutzung der Faltwerkwirkung entscheidend durch die Stützung entlang der Knicklinien bestimmt wird. Ein System ohne Stützung entlang der Knicklinien, das damit einem ebenen System ohne Scheibenbeanspruchungen entspräche, bei dem die Läufe und Podeste in einer Ebene liegen, wäre durch einen anderen Rißverlauf gekennzeichnet. Mit den unmittelbar beim Versagen entstandenen Schrägrissen wurde dieser bei fortfallender Stützung geänderte Rißverlauf vor allem im unteren Lauf an den Versuchskörpern auch sichtbar. Die aus der Auflagerung der Läufe an den Podestkanten wirksamen Linienlasten, hätten eine Konzentration und stärkere Ausprägung des Rißbildes zu der jeweiligen Podestseite hin hervorgerufen, auf der die Läufe in das Podest einbinden. Darüberhinaus wären an den Plattenoberseiten keine Risse entstanden.

So wie aus den Rißbildern auf das Vorhandensein der Stützung an den Knicklinien geschlossen werden kann, so kann mit den aufgezeichneten Rißverläufen jedoch auch die Nachgiebigkeit der Stützung belegt werden. Bei starrer unnachgiebiger Stützung wäre die Plattentragwirkung der Podeste an dreiseitig gelagerten Platten zu ermitteln. Mit bekannten Tabellenwerken /4,6,29/ ist leicht nachzuvollziehen, daß dreiseitig gelagerte Platten mit einer Einspannung des längeren Randes durch eine erhebliche Drillmomentenbeanspruchung gekennzeichnet sind, die ebenfalls zur Entstehung nicht paralleler Risse geführt hätte.

Die Aufzeichnung der Rißentwicklung verdeutlicht die bei Stahlbetonbauteilen bekannte allmähliche Ausbildung eines abgeschlossenen Rißbildes, indem sich bei steigender Belastung zwischen bestehenden Rissen neue Risse bilden und so den Rißabstand a_m langsam verringern. Interessant ist dabei im vorliegenden Fall auch, daß die Richtung der Risse über den

gesamten Beanspruchungsbereich in den Podesten nahezu unverändert blieb. Damit können größere Umlagerungen und belastungsabhängige Veränderungen des Tragverhaltens ausgeschlossen werden.

5.6 Traglasten der Versuchskörper

Die Traglasten der Versuchskörper, die den Versagenszuständen zuzuordnen sind, interessieren vor allem im Hinblick auf die Beurteilung des Sicherheitsabstandes eines bekannten Lastniveaus gegenüber der Bruchlast, da die zulässigen Schnittgrößen nach DIN 1045 aus der Division der Bruchschnittgrößen m_u und n_u mit dem Sicherheitsbeiwert τ ermittelt werden. Eine zutreffende Schnittgrößenverteilung, die zu große Abweichungen vom geforderten Sicherheitsabstand ausschließt, kann nur an einem wirklichkeitsnahen Tragmodell ermittelt werden. Dieser Zusammenhang erlaubt andererseits eine zuverlässige Überprüfung der Güte (Wirklichkeitsnähe) eines Berechnungsverfahrens und des dazu unterstellten Tragmodells durch Vergleich der rechnerischen und der im Versuch erreichten Bruchlast. Ein solcher Vergleich der Bruchlasten erfolgt im Abschnitt 7, um dabei auch die Ergebnisse aus den Nachrechnungen des Abschnitts 6 berücksichtigen zu können.

6 Rechnerische Untersuchung des Tragverhaltens gerader, gegenläufiger Podesttreppen

6.1 Allgemeines

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit erfolgte das Studium des Tragverhaltens von Treppen vorwiegend aufgrund experimenteller Untersuchungen, die zu den in den Abschnitten 3 bis 5 erläuterten Traglastversuchen zusammengefaßt worden waren. Daneben wurden zu den Versuchen jedoch auch ergänzende rechnerische Betrachtungen vorgenommen. Da die Erfassung der Faltwerkwirkung bei den untersuchten Treppensystemen - insbesondere wegen des unterschiedlichen Tragverhaltens zwischen den einzelnen Bauteilen - einer analytischen Lösung nur schwer zugänglich ist, wurden die Berechnungen nach der Finite-Element-Methode mit dem Programmsystem SAP IV auf der institutseigenen Rechenanlage durchgeführt.

Stellvertretend für gerade, gegenläufige Podesttreppen erfolgten die Berechnungen an einem System, bei dem die Anordnung der Läufe und Podeste sowie die Abmessungen dem Versuchskörper Treppe 2 weitestgehend entsprachen. Die dabei der Schnittgrößenermittlung zugrunde gelegte Elemententeilung und die Knotennummerierung des Elementnetzes sind für dieses System in Bild 43 dargestellt. Zur Idealisierung des Versuchskörpers wurde das viereckige dünne Platten- und Schalenelement (Elementtyp 6) verwandt. Dabei wurde für das Material ein linear, elastisches und isotropes Werkstoffverhalten angenommen. Die Auflagerlinien und die horizontalen Festhaltungen wurden mit Dehnfedern nachgebildet, die als Randelemente (Typ 7) in der Programmbibliothek zur Verfügung stehen und an die Elemente vom Typ 6 angebunden werden können. Durch Variation der Federsteifigkeiten dieser Randelemente konnten die Auflagerverhältnisse verändert und angepaßt werden.

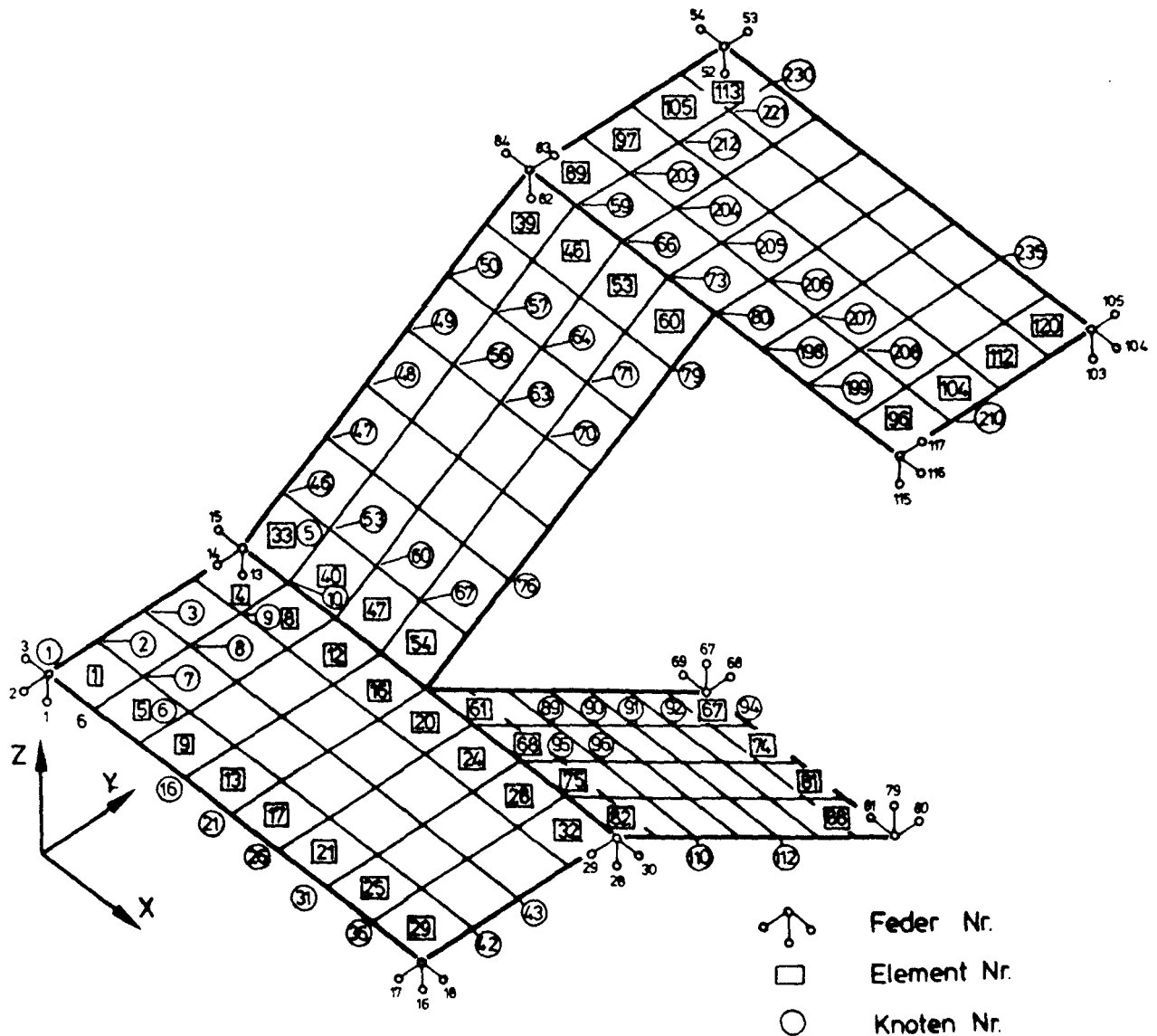


Bild 43: Elementeinteilung und Knotennummerierung des Treppensystems für die FE-Berechnung

6.2 Übersicht zum Berechnungsprogramm

Die rechnerischen Untersuchungen sollten vor allem zu solchen Tragwirkungen ergänzende Hinweise geben, die mit den Versuchsergebnissen wegen unverhältnismäßig großen Aufwandes für die dazu erforderliche Meßtechnik oder wegen der Beschränkung auf zwei Versuche nicht umfassend beschrieben und erfaßt werden konnten. Im Hinblick auf diese Zielsetzung sollten zunächst genauere Angaben zum Verlauf und zur Größenordnung der Scheibenspannungen des Treppensystems ermöglicht werden. Trotz der großen Anzahl an Dehnmeßstreifen war eine kontinuierliche Aufzeichnung der Scheibenbeanspruchung an den Ver-

suchskörpern nicht zu erreichen, da die Hauptrichtungen der Scheibentragwirkung nicht mit denen der Plattentragwirkung übereinstimmen und die Biegespannungen zudem deutlich höhere Werte erreichen. Diese Überlagerung der Tragwirkung aber auch der Einfluß der Rißbildung, der eine Abhängigkeit der gemessenen Dehnungen zur Entfernung des Dehnmeßstreifens vom Riß hervorruft, erlauben aufgrund der Versuchsergebnisse nur Hinweise auf die Scheibentragwirkung jedoch keinesfalls Angaben zum Spannungsverlauf. Zuverlässige Ergebnisse hierzu wären in Versuchen nur mit unverhältnismäßig hohem Meßaufwand zu erzielen.

Um jedoch den Versuchsaufwand auf ein vernünftiges Maß zu begrenzen, mußten bei der Konzeption und Gestaltung der Versuchskörper auch einige Abweichungen gegenüber für die Bau Praxis zutreffenderen Randbedingungen akzeptiert werden. Die rechnerischen Untersuchungen sollen Hinweise zum Einfluß dieser Abweichungen geben, die vor allem in einer gewissen, vertikalen Nachgiebigkeit der Auflagerlinien und der punktförmigen Anordnung der horizontalen Festhaltungen zu sehen sind (siehe Abschnitt 3.3.3).

Zur Beantwortung der in diesem Abschnitt aufgezeigten Fragestellungen wurden zwei unterschiedliche Treppensysteme berechnet, deren wichtigste Merkmale nachfolgend kurz beschrieben werden:

- Mit dem zuerst berechneten System (System 1) wurde der Versuchskörper Treppe 2 nachgebildet. Dazu wurden die Dehnsteifigkeiten der vertikalen Auflagerfedern an den Schmalseiten der Podeste so gewählt, daß ihre Summe der Dehnsteifigkeit der abgedrehten Schrauben gemäß Bild 28 entsprach. Am Fußpunkt des unteren Laufes wurde eine starre Linienlagerung unterstellt. Auch die Anordnung der horizontalen Dehnfedern stimmte genau mit der Lage der Festhaltungen am Versuchskörper überein. Die maßgebende Dehnsteifigkeit wurde mit der freien Länge der Festhaltungen zwischen dem Versuchskörper und dem Auflagerrahmen (siehe Bild 25) ermittelt.

- Die zweite Systemvariante (System 2) entsprach weitgehend in der Baupraxis zu erwartenden Verhältnissen. Für alle vertikalen Dehnfedern an den Auflagerlinien entlang der Podestschmalseiten und am Fußpunkt des unteren Laufes wurde die Dehnsteifigkeit so angesetzt, daß eine starre unnachgiebige Auflagerung entstand. An den Auflagerlinien wurden darüberhinaus alle Elementknoten unverschieblich gehalten. Die Auflagerung dieses Systems ist damit Systemen angenähert, bei denen die Podestplatten in angrenzende Deckenplatten oder unverschiebliche Wandscheiben einbinden. Auf die Einspannung der Auflagerlinien, die sich dabei in der Regel ergibt, wurde bei dem berechneten System im Hinblick auf eine bessere Vergleichbarkeit mit dem Versuchskörper und System 1 jedoch verzichtet.

6.3 Ergebnisse der rechnerischen Untersuchungen

6.3.1 Formänderungsverhalten

Die mit linear elastischem Materialgesetz errechneten Durchbiegungen beschreiben das wirkliche Formänderungsverhalten von Stahlbetonbauteilen nur bis zur Entstehung erster Risse zutreffend. Die rechnerischen Werte können daher hier lediglich zu einem qualitativen Überblick herangezogen werden. In Bild 44 sind die Durchbiegungen entlang eines Längsschnittes durch das Treppensystem dargestellt. Die Durchbiegungen zeigen einige für die Faltwerkwirkung typische Merkmale. So ergaben sich an den Knickstellen zwischen Podest und Lauf für die Knoten 25 und 80 gegenüber den anderen Bereichen deutlich geringere Durchbiegungen. Auffallend ist darüberhinaus, daß die Durchbiegungen des oberen Podestes größer sind als beim unteren Podest. Die Durchbiegungsunterschiede der Läufe sind geringer. Für den unteren Lauf, der am Fußpunkt gelenkig aufgelagert war, wurden erwartungsgemäß geringfügig größere Durchbiegungen ermittelt als am oberen Lauf.

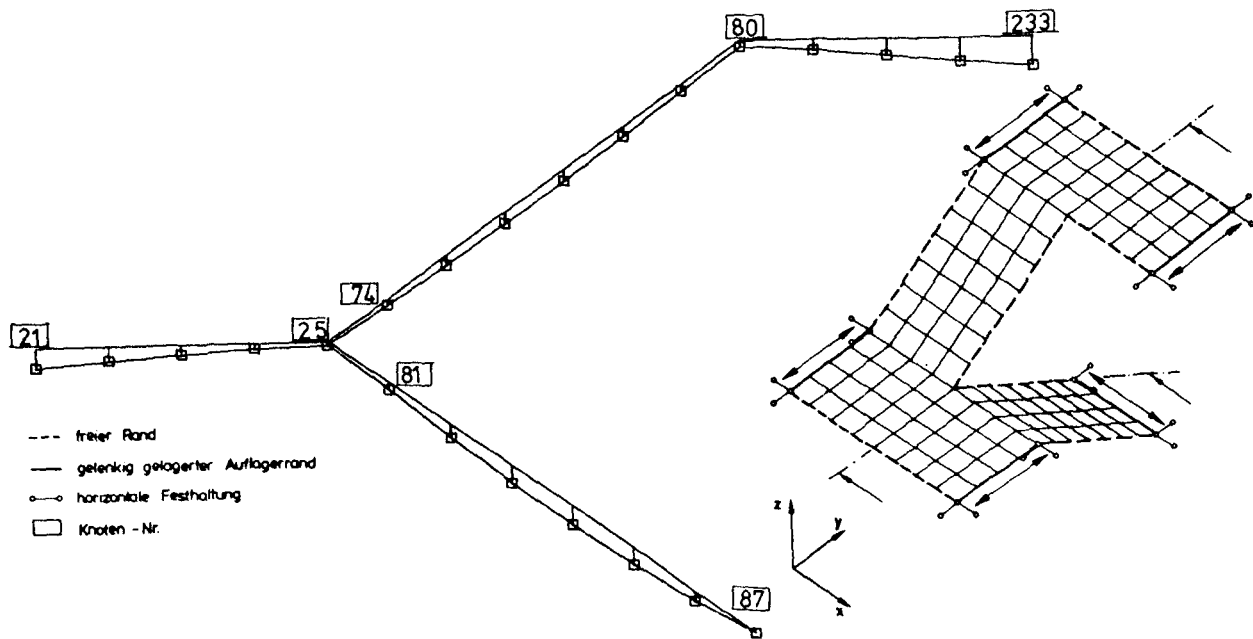


Bild 44: Rechnerisch ermittelter Durchbiegungsverlauf in Längsrichtung für System 2 mit horizontaler Festhaltung aller Auflagerknoten

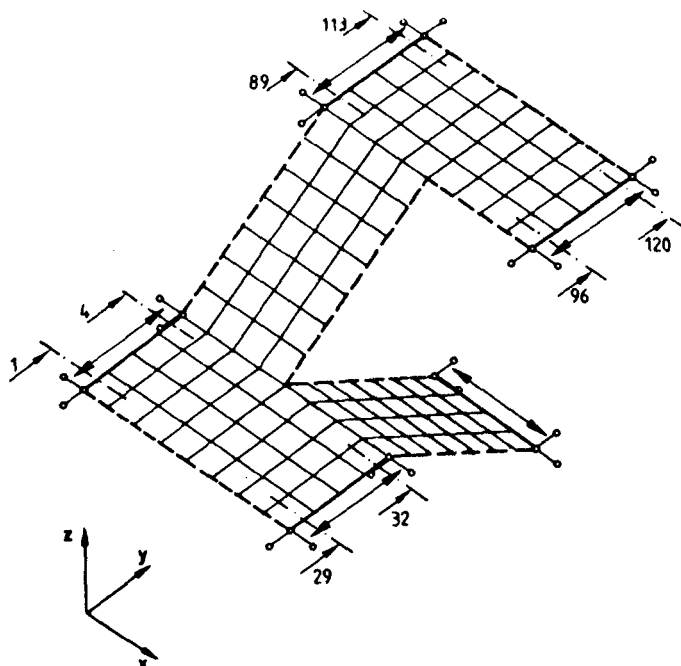
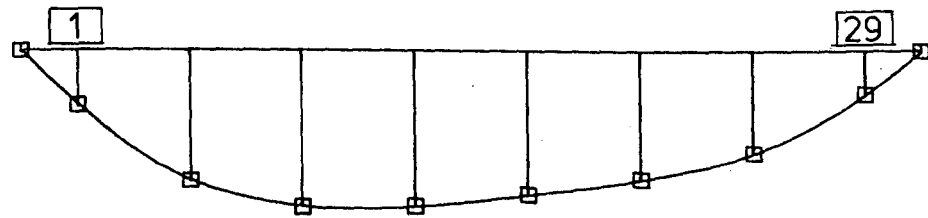
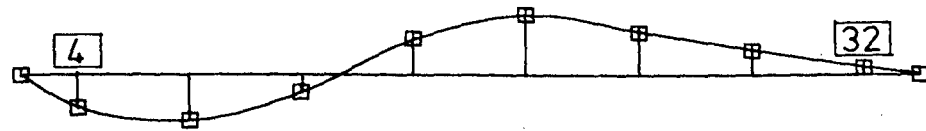
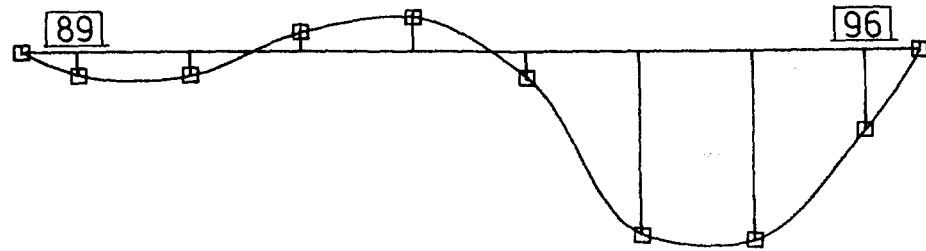
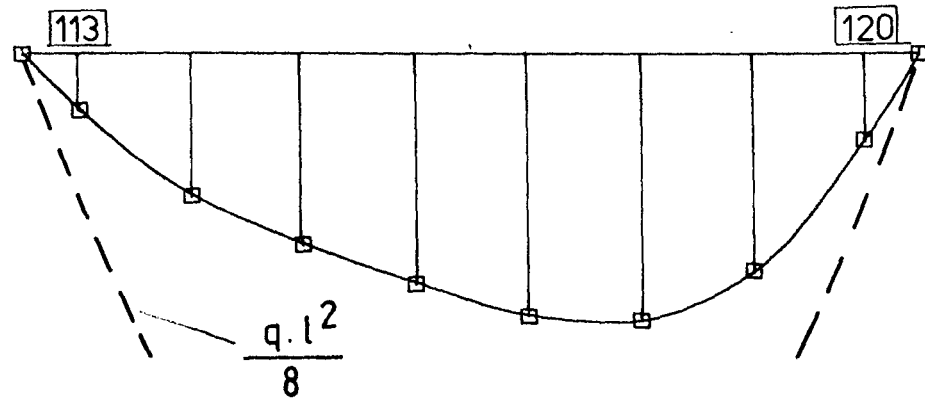
6.3.2 Plattentragwirkung

Der Bewehrungsgehalt und die Bewehrungsführung werden bei den in dieser Arbeit behandelten Treppen überwiegend durch die Biegebeanspruchungen infolge Plattentragwirkung bestimmt. Den Untersuchungen zum Biegetragverhalten ist daher besondere Bedeutung beizumessen. Eine Darstellung der rechnerisch ermittelten Momentenverläufe enthalten die Bilder 45 und 46 für das System 2. Dabei stimmt der Längsschnitt in Bild 45 mit dem in Bild 44 für die Darstellung der Durchbiegungen gewählten Schnitt überein. Ein Vergleich zeigt, daß die geringere Durchbiegung an den Knicklinien zu deutlich ausgeprägten Stützmomenten in der Längsrichtung führt, die etwa die gleiche Größenordnung wie die Momente in den Mittelbereichen der Läufe aufweisen.

Die in Bild 46 aufgetragenen Momentenverläufe in x-Richtung sind in den Schnitten dargestellt, die nach den vereinfachten Modellvorstellungen ohne Berücksichtigung der Faltwerkwirkung (siehe Abschnitt 2.2.1) als Haupttragrichtung anzusehen sind. Die in den Schnitten zwischen Element 113 und 120 sowie Ele-

ment 1 und 29 angedeuteten Momentenverläufe für die ungestützte Podestplatte (2-seitig gelenkig) unter gleichmäßig verteilter Flächenlast sollen dabei die Größenordnung der zu erwartenden Abweichung bei Vernachlässigung der Stützung an den Knicklinien veranschaulichen.

Ein Vergleich der Momentenverläufe untereinander verdeutlicht, daß bereits bei einer Berechnung mit Annahme linear elastischen Materialverhaltens Unterschiede erkennbar werden, die nur mit der größeren Nachgiebigkeit des Systems entlang der jeweils maßgebenden Knicklinienabschnitte zu erklären sind. So sind beispielsweise die Momentengrößtwerte an den freien Rändern (113 - 120, 1 - 29) jeweils zur weniger gestützten Seite verschoben. Diese Beobachtung wird besonders deutlich am oberen Podest, in das nur ein Lauf einbindet und bei dem daneben zwei freie Ränder gegenüber liegen. Auch in Verlängerung der Knicklinie zwischen den Elementen 93 und 96 entsteht hier neben dem Lauf damit ein parabelförmiger Momentenverlauf in x-Richtung. Ebenso sind an der unteren Knicklinie (Element 4 - 32) auf der Seite, in die der obere Lauf einbindet gegenüber der anderen Podesthälfte größere Momentenwerte erkennbar.



- freier Rand
- gelenkig gelagerter Auflagerrand
- horizontale Festhaltung
- Element - Nr.

Bild 45:
Momentenverlauf in
x-Richtung für die
Podeste des Systems 2

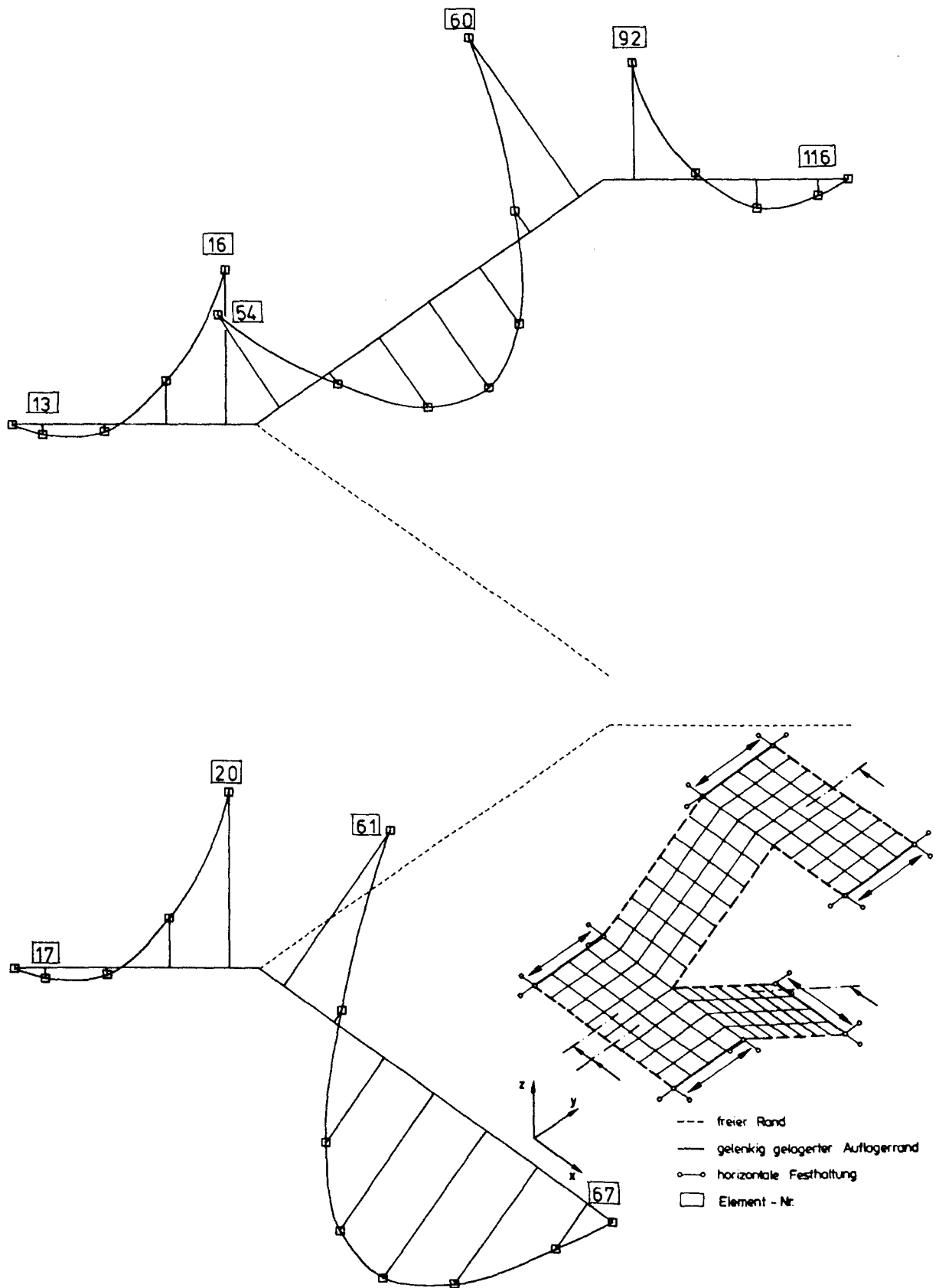


Bild 46: Momentenverlauf in y-Richtung des Systems 2

Die Biegebemessung von Flächentragwerken ist für die Hauptmomente in den jeweils maßgebenden Schnitten durchzuführen. In Bild 47 sind der Verlauf und die Größe der Hauptmomente deshalb für das System 2 qualitativ dargestellt. Es zeigt sich, daß die Richtung der Hauptmomente nur sehr geringe Abweichungen gegenüber der x- bzw. y-Richtung des gewählten Koordinatensystems, die auch die Bewehrungsrichtungen darstellen, aufweist. Die Momentenverläufe in den Bildern 45 und 46 stellen somit die nach einer Berechnung mit linear elastischem Materialgesetz bei der Bemessung zu berücksichtigende Verteilung zutreffend dar.

Die Darstellung der Hauptmomente ist geeignet, um Unterschiede zwischen den gerechneten Systemen aufzuzeigen. In Bild 48 sind daher auch die Hauptmomente für das dem Versuchskörper Treppe 2 entsprechende System 1 aufgetragen. Ein Vergleich der Hauptmomentenverläufe läßt erkennen, daß bei System 1 gegenüber System 2 deutliche Abweichungen der Hauptmomentenrichtungen entstehen. Diese sind in den Läufen etwas ausgeprägter als in den Podesten. Daneben erlaubt die Darstellung der Hauptmomente Aussagen zur Größenordnung der Biegemomente. Insbesondere im oberen Podest, aber auch am freien Rand des unteren Podestes ist bei System 1 (Bild 48) eine Zunahme der Momentenbeanspruchung in den Feldbereichen festzustellen.

Die in diesem Abschnitt hinsichtlich der Plattentragwirkung an den berechneten Systemen aufgezeigten Unterschiede deuten auf den Einfluß der geringeren Anzahl und der verminderten Dehnsteifigkeit der horizontalen Festhaltungen (Dehnfedern) bei System 1 hin.

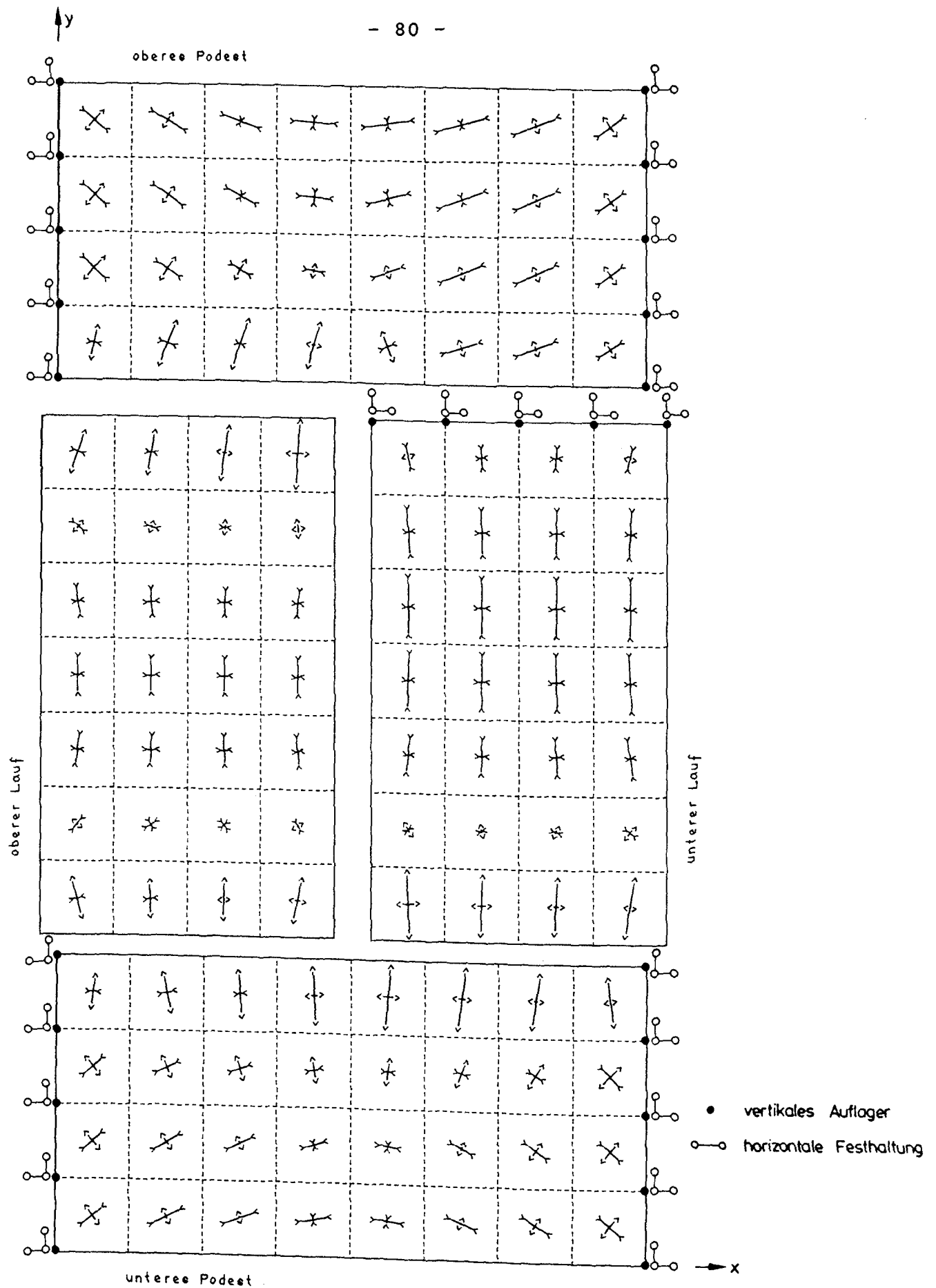


Bild 47: Hauptbiegemomente für System 2 mit durchgehender horizontaler Festhaltung an den Auflagerlinien

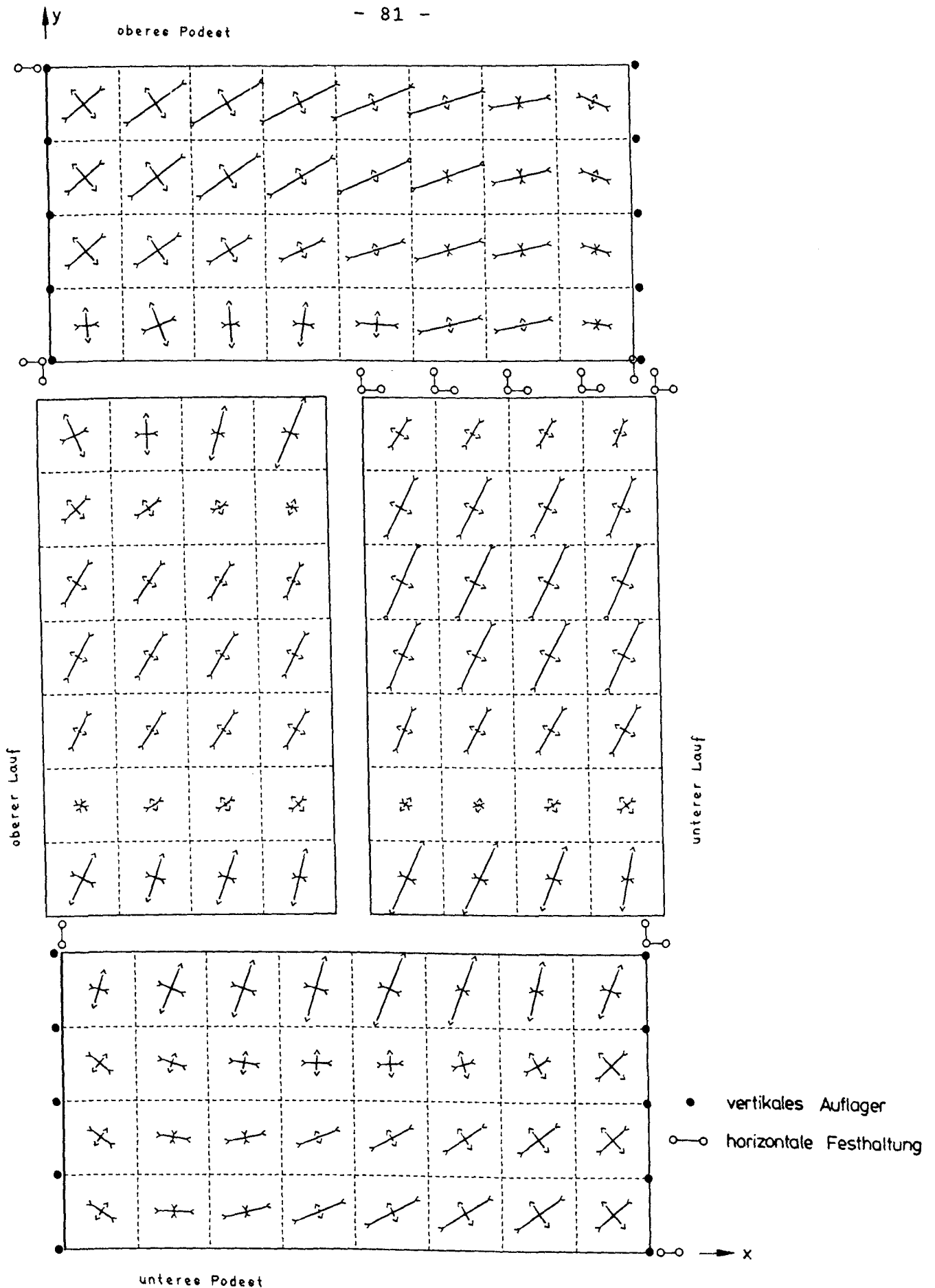


Bild 48: Hauptbiegemomente für System 1 mit einzelnen horizontalen Festhaltungen wie Versuchskörper Treppe 2.

6.3.3 Hauptspannungen in den Plattenmittelebenen

Neben dem Einfluß auf die Biegebeanspruchung und die Momentenverteilung waren an den berechneten Systemen auch die Auswirkungen der geänderten horizontalen Festhaltungen auf die Verteilung und Größenordnung der Hauptspannungen in den Plattenmittelebenen von besonderem Interesse, da diese die Scheibentragswirkung und damit die Stützung der Treppen an den Knicklinien charakterisieren. In den Bildern 49 und 50 sind die Hauptspannungen für alle Bauteile der berechneten Systeme dargestellt. Ein Vergleich beider Bilder zeigt, daß die Ausbildung (Anordnung, Dehnsteifigkeit) der horizontalen Festhaltungen die erwarteten großen Auswirkungen auf den Verlauf und die Größe der Scheibenbeanspruchung hervorruft. Zur Erläuterung seien die wichtigsten Merkmale der berechneten Hauptspannungszustände hier zunächst für das System 2 beschrieben, das durch einen gleichmäßigen kontinuierlichen Spannungsverlauf gekennzeichnet ist.

Im unteren Lauf mit gelenkiger Linienlagerung am Fußpunkt ist eine nahezu einheitliche Hauptspannungsrichtung für die annähernd parallel zu den freien Rändern verlaufenden Druckspannungen erkennbar. Die Größe dieser Druckspannungen erhöht sich zum Treppenauge hin. Demgegenüber ist aus dem Verlauf der Hauptspannungen im oberen Lauf eine schräge Druckstrebe erkennbar, die von der oberen rechten Laufecke in der Mitte des oberen Podestes nach links unten zur Auflagerlinie des unteren Podestes verläuft. Diese Druckstrebe wird von einer Zugstrebe gekreuzt, die diagonal zwischen den beiden anderen Eckpunkten des oberen Laufes verläuft und Zugspannungen aufweist, deren Größe wegen der Annahme linear elastischen Materialverhaltens etwa den Druckspannungen entspricht. Im Vergleich zu den Läufen verlaufen die Hauptspannungen - vorwiegend Druckspannungen - in den Podesten weniger kontinuierlich. Ihre Größe ist allerdings auch deutlich geringer und nimmt ausgehend von den Knicklinien zum freien Rand hin rasch ab.

Gegenüber diesen für System 2 errechneten Hauptspannungsverläufen ergaben sich für System 1 deutliche Änderungen als Folge der nur punktwise angeordneten nachgiebigeren Festhaltungen (siehe Bild 50). Im unteren Lauf ist eine vergrößerte Abweichung der Hauptspannungsrichtung von der Laufrichtung erkennbar. Die Druckspannungen am inneren freien Rand sind erheblich größer, während am äußeren freien Rand des unteren Laufes bei System 1 sogar Zugspannungen entstehen. Auch im oberen Lauf sind Änderungen der Hauptspannungsrichtung zu erkennen. Sie weisen darauf hin, daß die einseitige horizontale Festhaltung der Podeste in x-Richtung mit einer Anordnung auf gegenüberliegenden Seiten auch zu Schubbeanspruchungen in den Läufen parallel zu den Knicklinien führt. Daneben ist für den oberen Lauf eine Verringerung der Druckspannungen bei gleichzeitiger Erhöhung der Zugspannungen an der oberen Knicklinie im Element 39 (siehe Bild 43) entstanden. Die bereits bei der Erläuterung von System 2 erwähnten schrägen Druck- und Zugstreben im oberen Lauf bleiben allerdings auch bei System 1 erhalten.

Die einseitige horizontale Festhaltung ist zwangsläufig mit erhöhten Scheibenbeanspruchungen der Podeste verbunden. Insbesondere für das untere Podest entstehen daraus Zugbeanspruchungen in x-Richtung aus den x-Komponenten der Stützkräfte des oberen Laufs. Im oberen Podest wurden vor allem unmittelbar an den Festhaltungen höhere Zugkräfte errechnet.

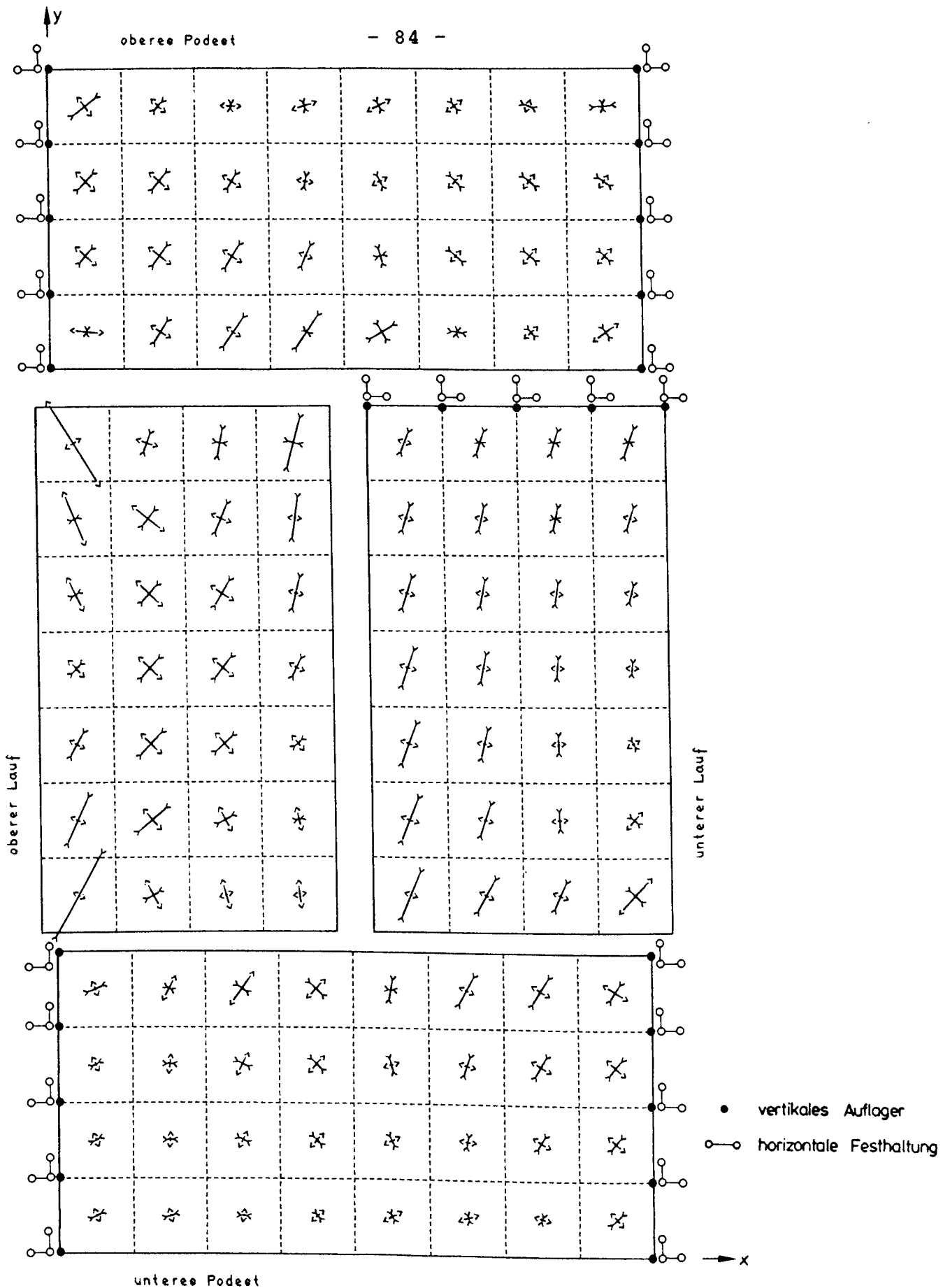


Bild 49: Hauptspannungen in den Plattenmittelebenen für System 2 mit durchgehender horizontaler Festhaltung an den Auflagerlinien

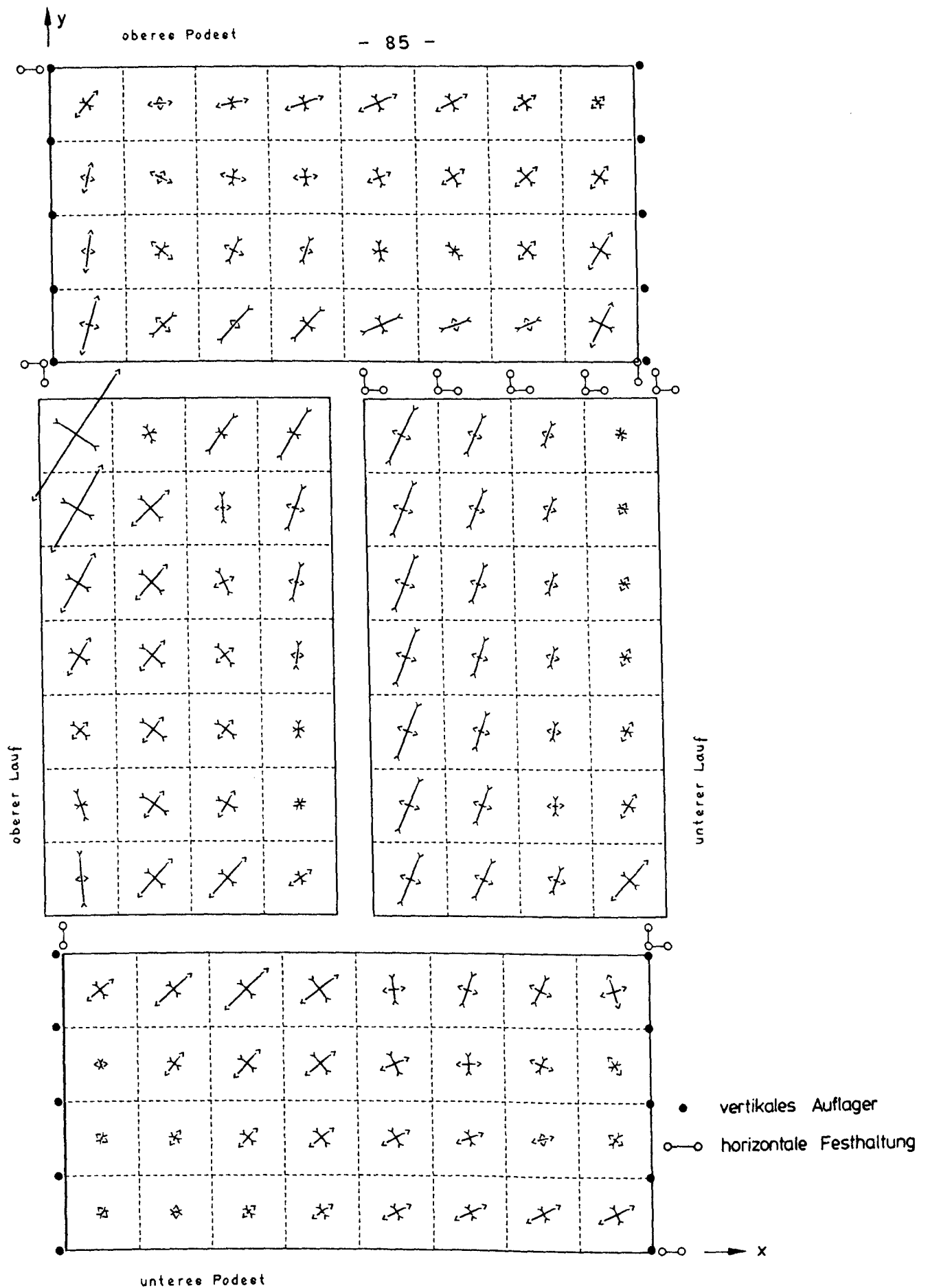


Bild 50: Hauptspannungen in den Plattenmittelebenen für System 1 mit einzelnen horizontalen Festhaltungen wie Versuchskörper Treppe 2

6.3.4 Auflagerkräfte

Die errechneten Auflagerkräfte der in diesem Abschnitt untersuchten Treppen sind in den Bildern 51 und 52 für alle Auflagerlinien des Systems 2 aufgetragen. Um einen Vergleich mit System 1 zu ermöglichen sind die an diesem System errechneten Kräfte als Zahlenwerte ebenfalls mit angegeben. Da die horizontalen Auflagerkräfte bei System 1 nur Einzelwerte darstellen, die keinen kontinuierlichen Verlauf entlang einer Auflagerlinie ergeben, wurde auf eine eigene graphische Darstellung der Werte dieses Systems jedoch verzichtet.

Der qualitative Verlauf der vertikalen Auflagerkräfte läßt für beide Systeme eine gewisse Übereinstimmung erkennen. So ergeben sich ausgeprägte Extremwerte jeweils direkt an den Knicklinien zwischen Lauf und Podest, also für die Dehnfeder 82 am oberen Podest und die Dehnfedern 13 und 28 am unteren Podest. Zwischen beiden Systemen ist insofern ein Unterschied erkennbar als bei System 1 gegenüber System 2 am oberen Podest höhere und am unteren Podest niedrigere Auflagerkräfte errechnet wurden. Dies ist auf die nachgiebigere Stützung an der unteren Knicklinie zurückzuführen, die bei System 1, das dem Versuchskörper Treppe 2 entsprach, eine Aufhängung von Lasten an den Auflagerlinien des oberen Podestes begünstigte.

Zu den errechneten Auflagerkraftverläufen sei hier noch angemerkt, daß sie vor allem mit der Zielsetzung dargestellt wurden, die Ableitung der Stützkräfte zu veranschaulichen, die sich aus den Scheibenspannungsverläufen des vorigen Abschnittes ergeben. Zu beachten ist dabei im Hinblick auf die Abschätzung einer wirklichkeitsnahen Auflagerkraftverteilung, daß die Ausbildung der Spitzen hier durch die Rechenannahmen und die gewählte Idealisierung des Systems begünstigt wird und unter baupraktischen Verhältnissen, insbesondere bei Auflagerung auf Mauerwerk, weniger ausgeprägt ist. Um die erforderliche Verteilung der Auflagerpressung aufzuzeigen, sei für den Spitzenwert aus Bild 51 folgende kleine Beispielrechnung angegeben:

Beispiel: Steinfestigkeit $7,5 \text{ MN/m}^2$

Mörtelgruppe II

Auflagertiefe $17,5 \text{ cm}$

$$\text{erf. Auflagerlänge } l_A = \frac{39 \cdot 10^{-3}}{0,9 \cdot 0,175} = \underline{0,25 \text{ m}}$$

$39 \cdot 10^{-3}$: Auflagerkraft aus FE-Rechnung in MN

0,9 : $\sigma_{Azul.}$ nach DIN 1053, Tabelle 10

0,175 : angenommene Auflagertiefe

Das Beispiel zeigt, daß auch bei Mauerwerk nur vergleichsweise kleine Längen erforderlich sind, um die zulässigen Pressungen einzuhalten.

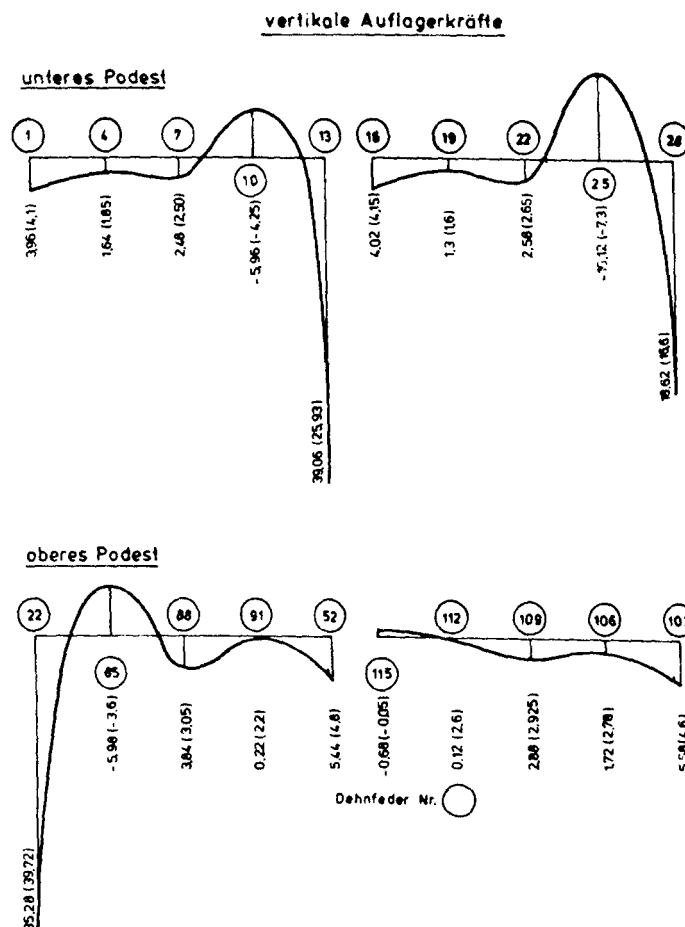
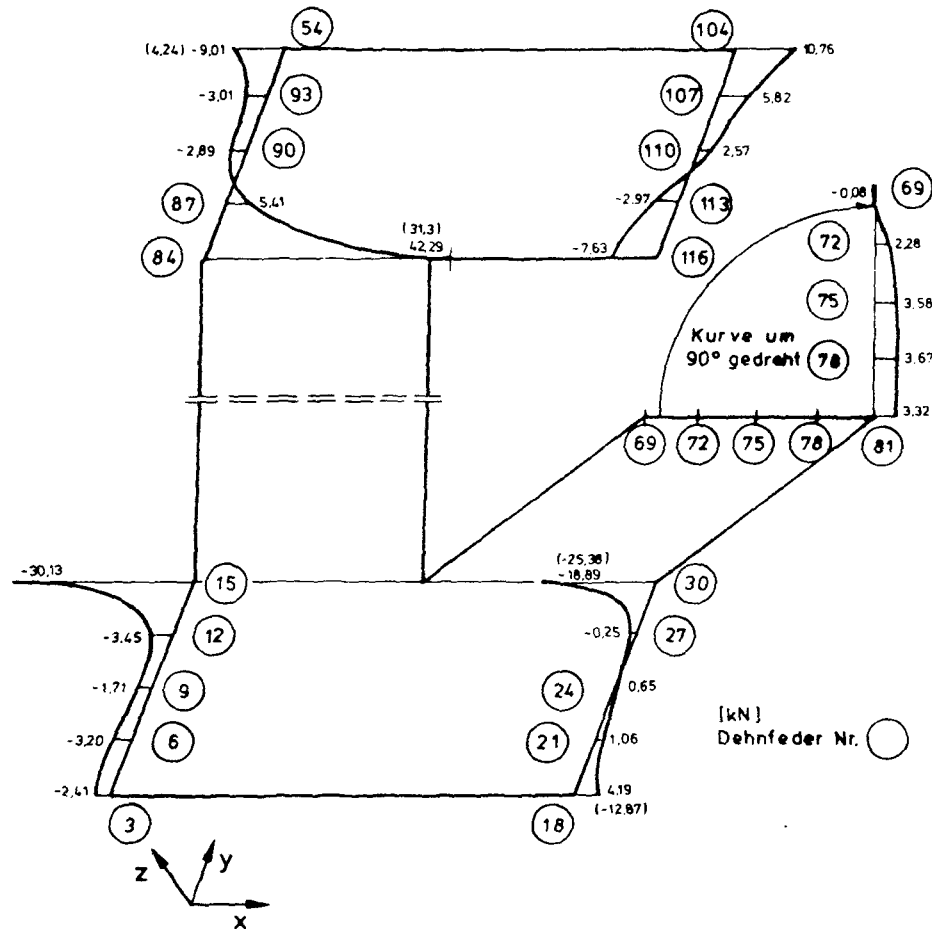


Bild 51: Vertikale Auflagerkräfte der berechneten Treppensysteme, Darstellung der Verläufe für System 2 mit horizontal unverschieblichen Auflagerlinien, Werte für System 1 in ()

horizontale Auflagerkräfte in x - Richtung



horizontale Auflagerkräfte in y - Richtung

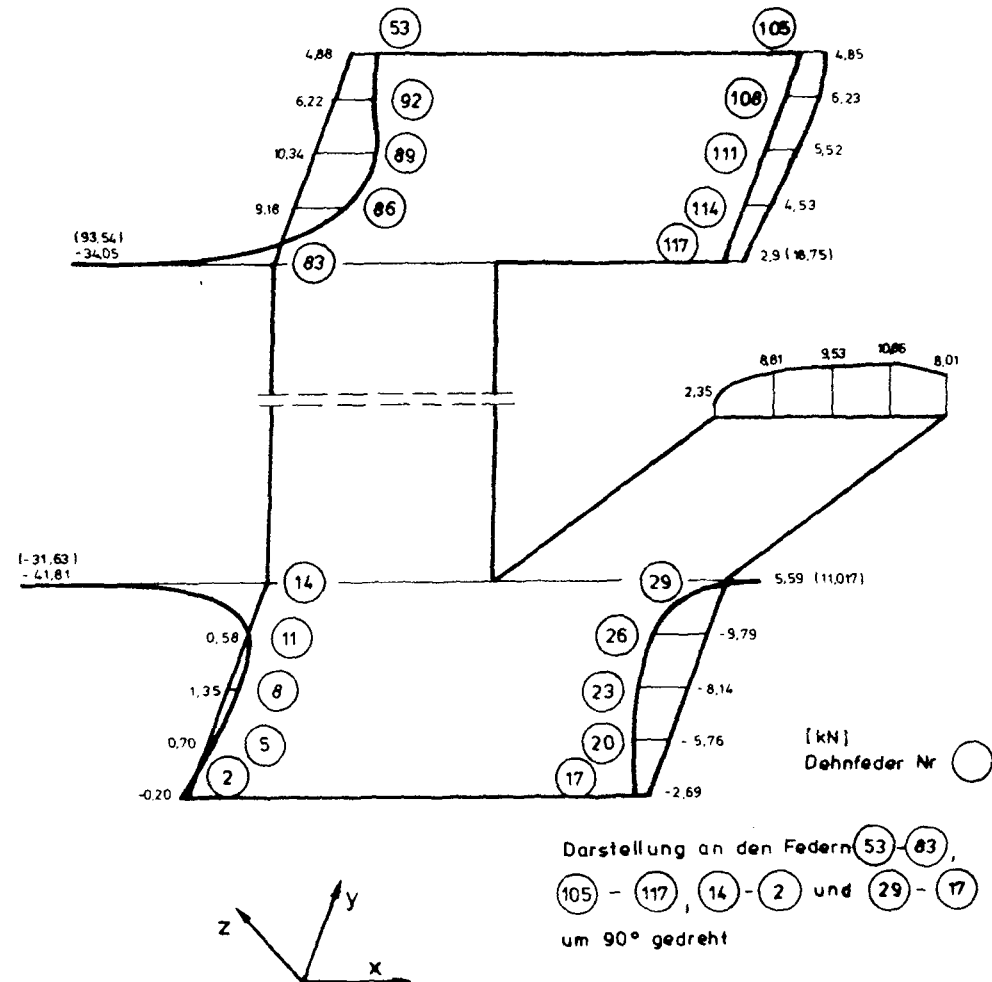


Bild 52: Horizontale Auflagerkräfte der berechneten Treppensysteme, Darstellung der Verläufe für System 2 mit horizontal unverschieblichen Auflagerlinien, Werte für System 1 in ()

7 Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen und den Berechnungen

7.1 Allgemeines

Die gemeinsame theoretisch, rechnerische und experimentelle Untersuchung, bei der die Ergebnisse der Traglastversuche durch Berechnungen nach der FE-Methode abgesichert wurden, stellt eine aussagekräftige und aufeinander abgestimmte Vorgehensweise bei der Beurteilung des Tragverhaltens der betrachteten Treppensysteme dar. Auf die Zielsetzung der rechnerischen Untersuchungen wurde bereits in Abschnitt 6.1 hingewiesen. Daher sei hier lediglich ergänzend auf die Bedeutung der Versuche hingewiesen. Sie sind für eine umfassende Beurteilung des Tragverhaltens notwendig, da Idealisierungen auch bei den heute zur Verfügung stehenden Rechenverfahren unerlässlich sind. Als Beispiele seien hier aufgeführt, daß z.B. das Werkstoffverhalten nach dem Aufreißen des Betons in der Zugzone allenfalls angenähert erfaßt werden kann und daß auch die Diskretisierung des Finite-Element-Netzes nicht beliebig zu verkleinern ist, um den Rechenaufwand nicht zu sehr anwachsen zu lassen.

7.2 Vergleich der Durchbiegungen

Die Auswirkung der Annahme linear elastischen Materialverhaltens wurde hinsichtlich der für das Formänderungsverhalten zu erwartenden Abweichungen in Abschnitt 5.3.1 aufgezeigt. Ein Vergleich der absoluten Durchbiegungswerte aus dem Versuch und aus der Berechnung ist daher nicht möglich. Eine Gegenüberstellung muß somit hier auf den qualitativen Vergleich der Biegeflächen beschränkt bleiben. Trotzdem können daraus wichtige Hinweise abgeleitet werden. Dazu seien nachfolgend zunächst die Übereinstimmungen angegeben:

- Die Durchbiegung des oberen Podestes, in das nur ein Lauf einbindet, war sowohl in den Versuchen (siehe Bilder A13 und A14) als auch nach der Berechnung (siehe Bild 44) deutlich größer als die Durchbiegung des unteren Podestes, das bei Treppe 2 und dem entsprechenden gerechneten System 1

mit zwei Läufen monolithisch verbunden war. Nach den Näherungsverfahren, die nur die Plattentragwirkung erfassen (siehe Abschnitt 2.2.1) hätte das untere Podest im Gegensatz zu diesen Ergebnissen eine größere Durchbiegung aufweisen müssen. Da an Treppe 1 - beide Podeste besaßen bei diesem Versuchskörper gleiche Biegesteifigkeiten, ein Unterschied bestand nur in der Auflagerung des jeweils unter den Podesten angeordneten Laufes - auch eine erheblich größere Durchbiegung am oberen Podest gemessen wurde, kann dieser Durchbiegungsunterschied vorwiegend auf die unnachgiebigere Stützung durch die Läufe am unteren Podest zurückgeführt werden, die aus der Linienlagerung am Fußpunkt des unteren Laufes und der Einbindung des oberen Laufes entsteht. Unterschiedliche Biegesteifigkeiten der Podeste in Querrichtung, wie sie aus der Mitwirkung der abgewinkelten Läufe entstehen können, haben hier für die Durchbiegung eine untergeordnete Bedeutung.

- Die Durchbiegung entlang der Knicklinien zwischen Lauf und Podest ist geringer als die Durchbiegung entlang des freien Randes am jeweils betrachteten Podest. Dieses Ergebnis der Berechnung stimmt mit den Messungen im Bruchlastzyklus 2 beider Versuche überein (siehe Bild 31).
- Die Durchbiegungen der Läufe sind an den Knicklinien geringer als in den Laufmitten.

Als Ergebnis dieser aus der Gegenüberstellung der Durchbiegungen festgestellten Übereinstimmungen ist festzuhalten, daß eine Abstützung der Podeste entlang der Knicklinien aufgezeigt werden konnte. Ergänzend dazu sei jedoch auch noch auf einen Unterschied zwischen den Versuchsergebnissen und den Berechnungen hingewiesen, dessen Erfassung für die Ableitung eines wirklichkeitsnahen Tragmodells als bedeutungsvoll anzusehen ist.

In den Versuchen wurden entlang der Knicklinie gegenüber den Berechnungen vergleichsweise größere Durchbiegungen gemessen. Ein Vergleich der Bilder 29 bis 31 mit Bild 44 verdeutlicht dies. Auch wenn dabei im Bruchlastzyklus 1 der Versuche die geringe Nachgiebigkeit der horizontalen Festhaltungen mitver-

antwortlich war, so beweisen jedoch die Durchbiegungen im Bruchlastzyklus 2 mit starrer Festhaltung der unteren Podeste, daß die Stützung durch die Läufe keineswegs als starr angesehen werden kann. Die Annahme des linear elastischen Materialverhaltens und die Vernachlässigung der Steifigkeitsabnahme infolge Rißbildung führt nach den Versuchsergebnissen zur Unterschätzung der Durchbiegung an den Knicklinien.

7.3 Vergleich des Plattentragverhaltens

Eine vergleichende Betrachtung dieser Tragwirkung ist insofern schwierig als die Ergebnisse der Berechnung in Form von Schnittgrößenverläufen vorliegen während aus den Versuchsergebnissen über Dehnungen und Rißverläufe auf die Plattentragwirkung geschlossen werden muß. Trotzdem sind einige abgesicherte Aussagen möglich.

Der errechnete Verlauf der Hauptbiegemomente weist gemäß den Bildern 47 und 48 in den Bereichen, die an den Versuchskörpern die ausgeprägtesten Rißbildungen zeigten, Hauptrichtungen auf, die nahezu senkrecht zu den Rissen der Versuchskörper verlaufen (siehe Anlagen A40 bis A43). Diese Beobachtung gilt vor allem für die Knicklinien und die Podeste.

Daneben ist auch eine Übereinstimmung der rechnerischen Momentenverteilung mit den Versuchsergebnissen erkennbar. So wurde insbesondere die Ausbildung der für die Faltwerk Wirkung charakteristischen Stützmomente senkrecht zu den Knicklinien durch die Dehnungsmessungen an der hier oben liegenden Haupttragbewehrung bestätigt. Allerdings deutet ein Vergleich der Stahldehnungen an den Knicklinien mit Werten in anderen Bauteilbereichen - z.B. an den freien Podesträndern - auf eine ausgeglichene Momentenverteilung bei den Versuchskörpern hin. Der Einfluß der Rißbildung und die Nachgiebigkeit der Stützung des Treppensystems an den Knicklinien verringern die Ausbildung der in Bild 46 bei dem berechneten Verlauf erkennbaren Momentenspitzen. Für die Feldbereiche der Läufe und die x-Richtung der Podeste ergeben sich daraus erhöhte Biegemomente.

7.4 Vergleich der Scheibenbeanspruchung

Wegen der Bedeutung der Scheibenbeanspruchung für die Stützung der betrachteten Treppensysteme bestand eine wesentliche Zielsetzung der Berechnung in der Bereitstellung ergänzender Angaben zur Ausbildung der Scheibentragwirkung. Auch für die Beurteilung der hier interessierenden Zusammenhänge müssen zum Vergleich der Berechnungsergebnisse mit denen der Versuche verschiedene Größen betrachtet werden. Die kontinuierliche Bestimmung der Scheibenspannungen in den Plattenmittelebenen, mit der Berechnung ist dabei allerdings sehr hilfreich.

Die Hauptspannungsverläufe in den Bildern 49 und 50 bestätigen, daß in den Läufen erhebliche Scheibenbeanspruchungen entstehen. Horizontale Auflagerkräfte sind daher für die Auflagerlinien vor allem unmittelbar an den Knicklinien zu erwarten. Die Richtung der Hauptspannungen in Bild 50 zeigt, daß bei der gewählten, dem Versuchskörper Treppe 2 entsprechenden Anordnung der Festhaltungen, vorwiegend Zugkräfte in den Festhaltungen entstehen müssen. Lediglich an der Festhaltung H83 in y-Richtung am oberen Podest entsteht eine Druckkraft infolge der an dieser Auflagerlinie aufgehängten Lasten, die auch zu den Zugbeanspruchungen im oberen Lauf führen. Der unmittelbare Zusammenhang der Scheibenspannungen mit den in Bild 51 angegebenen horizontalen Auflagerkräften wird hierbei deutlich.

Eine Gegenüberstellung zu den Versuchsergebnissen erlaubt Bild 52. Hier sind die an Treppe 2 bei der Versuchsdurchführung gemessenen Horizontalkräfte zusammen mit den rechnerischen Werten des Systems 2 dargestellt. Eine wichtige Übereinstimmung der Versuchswerte mit den errechneten Werten ist hierbei schon darin zu sehen, daß die Beanspruchungsrichtung für alle Festhaltungen übereinstimmt. Die erkennbare Abweichung der absoluten Werte darf nicht überschätzt werden, da gerade im Hinblick auf die horizontale Lagerung eine Nachbildung der Idealisierungen des Rechenmodells schwer möglich ist. So nahmen z.B. die Festhaltungen am Versuchskörper nicht nur Kräfte in Längsrichtung auf, sondern besaßen natürlich auch senkrecht dazu eine Biegesteifigkeit (siehe hierzu Ab-

schnitt 3.3.3) und Reibungswiderstände, die ihrerseits in der Berechnung schwer erfaßt werden konnten. Die Darstellung in Bild 52 deutet demnach daraufhin, daß aus der für die Horizontalkräfte erkennbaren Übereinstimmung auch auf einen ähnlichen Scheibenspannungsverlauf geschlossen werden darf, wie er in Bild 50 aufgezeigt wurde. In diesem Zusammenhang sei abschließend noch darauf hingewiesen, daß die an der Festhaltung H83 im Versuch gemessenen niedrigen Werte ebenfalls nur mit der Aufhängung von Lasten über den oberen Lauf erklärt werden können.

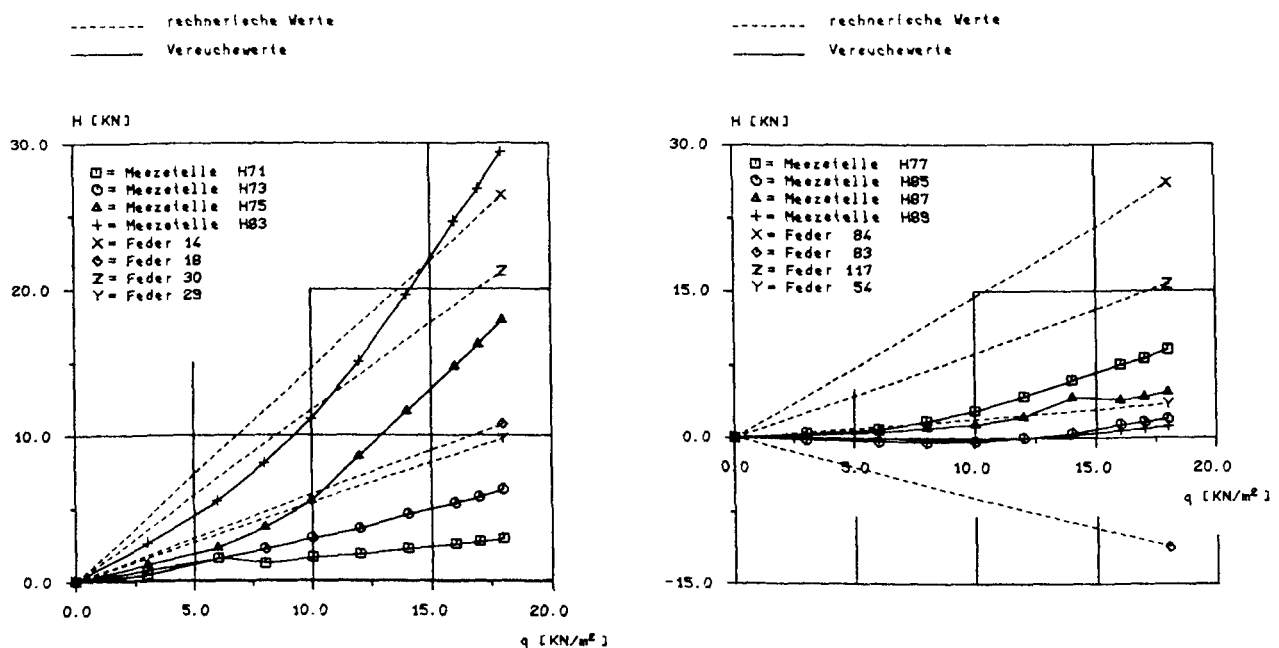


Bild 53: Vergleich der berechneten Kräfte in den horizontalen Festhaltungen mit den an Versuchskörper Treppe 2 gemessenen Werten.

Auch die Verteilung und Größenordnung der vertikalen Auflagerkräfte wird entscheidend von der Scheibentragwirkung des Treppensystems bestimmt. Die nach Bild 51 an den Knicklinien vorhandenen Auflagerkraftspitzen, wurden bei den Auflagerkraftmessungen an den Versuchskörpern (siehe dazu Anlagen A28 - A33) ebenfalls festgestellt und ergeben damit einen weiteren Hinweis auf die Übereinstimmung des Scheibenspannungszustandes am Versuchskörper mit dem vergleichbaren

berechneten System 1. Trotz der in den vorigen Abschnitten aufgezeigten Nachgiebigkeit der Stützung an den Knicklinien ist danach bei Treppen mit Ausnutzung der Faltwerkwirkung eine Scheibenbeanspruchung parallel zu den Plattenmittelebenen vorhanden, die bei der Berechnung solcher Systeme nicht unberücksichtigt bleiben darf.

7.5 Vergleich der Bruchlasten

Der bereits in Abschnitt 5.6 angesprochene Vergleich der Bruchlasten wird hier für die beim Versuch im Bruchlastzyklus 1 an Treppe 2 erreichte Last sowie die Bruchlast nach dem Näherungsverfahren ohne Ausnutzung der Faltwerkwirkung gemäß Bild 6 und die Bruchlast nach der FE-Berechnung des Systems 1 durchgeführt.

Bei der Versuchsdurchführung entstand der Versagenszustand im Bruchlastzyklus 1 am oberen Podest von Treppe 2. Dabei war der Dehnungszustand in etwa durch das Erreichen der Grenzhdehnungen gemäß DIN 1045 /33/ gekennzeichnet. Im Versuch entsprach der letzten vor dem Versagen gemessenen Laststufe eine Pressenlast von $F_{\text{ges}} = 126,0 \text{ kN}$. Zu dieser Belastung sind noch das Eigengewicht des Versuchskörpers sowie das Gewicht der Verteilungsträger der Belastungseinrichtung zu addieren. Die Bruchlast, die im Bruchlastzyklus beider Versuche gleich groß war, ergab sich zu:

$$F_u = 142,5 \text{ kN} \quad (\text{Bruchlastzyklus 1})$$

Zum Vergleich mit der im Versuch ermittelten Bruchlast soll hier die rechnerische Bruchlast für den Versuchskörper Treppe 2 nach dem in der Baupraxis verbreitetsten Näherungsverfahren, gemäß Bild 6, ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der in den Bildern A1 bis A3 dargestellten Bewehrung ergeben sich folgende Bruchmomente:

Podest in Querrichtung, Läufe in Feldmitte

Plattendicke $d = 8 \text{ cm}$, $h = 6,8 \text{ cm}$

Bewehrung BSt 500/550, $\varnothing 4$, $s = 10 \text{ cm}$

$$a_s = 1,26 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$m_{su} = a_s \cdot \sigma_{s,u} \cdot k_z \cdot h \approx 1,26 \cdot 50 \cdot 0,95 \cdot 0,068 = \underline{4,07 \text{ kNm/m}}$$

Einspannung an den Knicklinien

Plattendicke $d = 8 \text{ cm}$, $h = 6,8 \text{ cm}$

Bewehrung BSt 500/550, $\varnothing 4$, $s = 8 \text{ cm}$

$$a_s = 1,575 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$m_{su} \approx 1,575 \cdot 50 \cdot 0,95 \cdot 0,068 = \underline{5,087 \text{ kNm/m}}$$

Schnittgrößen des oberen Podestes infolge Eigengewicht

Das Einspannmoment des Laufes wird als Linienmoment und die Auflagerkraft als Linienlast auf das Podest abgegeben. Damit beträgt die Podestbelastung:

$$q = 0,08 \cdot 25 = 2,00 \text{ kN/m}^2$$

$$m_R = 0,46 \text{ kNm/m}$$

$$q_L = 1,824 \text{ kN/m}$$

Nach /29/ Platten-Nr. II/11 ergeben sich die Momente in Querrichtung bei gelenkiger Auflagerung der Schmalseiten wie folgt:

$$m_{xrm1} = 2,305 \text{ kNm/m} \quad (\text{Knicklinie})$$

$$m_{xm} = 1,887 \text{ kNm/m} \quad (\text{Podestmitte})$$

$$m_{xrm2} = 1,595 \text{ kNm/m} \quad (\text{freier Rand})$$

Für die Aufnahme des Momentes aus den entsprechend der Versuchsdurchführung angeordneten Einzellasten verbleibt ein Differenzbetrag von

$$m = 4,07 - 2,305 = 1,765 \text{ kNm/m}$$

Diesem zusätzlich zum Eigengewicht aufnehmbaren Differenzmoment entspricht folgende Gesamtpressenlast:

$$F_{\text{ges}} = 6 \cdot 2,96 = 17,76 \text{ kN}$$

Bei der Bestimmung der endgültigen Bruchlast wird noch die höhere Streckgrenze des Stahles gemäß Tabelle 3 berücksichtigt. Um die mit den Versuchsergebnissen vergleichbare Bruchlast der Pressen zu berechnen, muß das Gewicht der Belastungseinrichtung (2,18 kN) abgezogen werden. Damit folgt:

$$F_u \approx 726/500 \cdot 17,76 - 2,18 + 14,0 = 37,6 \text{ kN}$$

Zum Vergleich sei abschließend noch die Bruchlast des Systems nach der FE-Rechnung mitgeteilt. Sie ergibt sich bei System 1 im oberen Podest für Element 117 am freien Rand zu

$$F_u = 176,3 \text{ kN}$$

Dabei wurde auch die Normalkraft aus der Scheibenbeanspruchung berücksichtigt. Ergänzend sei hier noch darauf hingewiesen, daß die Versagensstelle nach der FE-Rechnung mit den Bereichen übereinstimmt, in denen bei den Versuchen die größten Stahldehnungen gemessen wurden. Zur besseren Übersicht seien die Bruchlasten nachfolgend zusammengestellt:

Näherungsverfahren ohne Ausnutzung
der Faltwerkwirkung gemäß Bild 6..... $F_u = 37,6 \text{ kN}$

Bruchlasten in den Versuchen..... $F_u = 142,5 \text{ kN}$

Bruchlast nach der FE-Rechnung
für System 1..... $F_u = 176,3 \text{ kN}$

8 Vorschlag für ein vorläufiges Näherungsverfahren

8.1 Allgemeines

Die in diesem Bericht dargestellten und erläuterten Ergebnisse aus den Untersuchungen an geraden, gegenläufigen Plattentreppen mit Podesten haben bestätigt, daß solche Systeme bei Ausnutzung der Scheibentragwirkung ein sehr viel günstigeres Tragverhalten aufweisen, als es bei Anwendung der derzeit gebräuchlichen Näherungsverfahren (siehe Abschnitt 2.2) zur Berechnung von Treppen unterstellt wird. Der wesentliche Vorteil ist dabei vor allem in der geringeren Durchbiegung entlang der Knicklinien zu sehen, die sich gegenüber den anderen Bereichen als Folge der stützenden Scheibenwirkung einstellt. Trotz des Fortfalls von Podestbalken und Vermeidung hoher Bewehrungskonzentrationen aus der Anordnung versteckter Unterzüge wird so an den Knicklinien eine Durchlaufwirkung erzielt. Jedes Berechnungsverfahren, das gegenüber den bisherigen Näherungsansätzen durch größere Wirklichkeitsnähe auch zu Bewehrungseinsparungen und damit zu höherer Wirtschaftlichkeit führen soll, muß daher diesen günstigen Einfluß der Faltwerkwirkung, der sich aus der kombinierten Platten- und Scheibentragwirkung der Treppensysteme ergibt, berücksichtigen.

Neben dem Nachweis der Stützung des Treppensystems haben die Untersuchungen zu dieser Arbeit jedoch ebenfalls offengelegt, daß die Stützung entlang der Knicklinien keineswegs als starr angenommen werden kann. So ergibt z.B. der Ansatz linear elastischen Materialverhaltens zu geringe Durchbiegungen an den Knicklinien und führt damit zu einer Überschätzung der Stützmomente. Auch eine Näherungsberechnung nach einem vereinfachten Tragmodell muß deshalb den Einfluß der Rißbildung und dabei die Mitwirkung des Betons berücksichtigen, um zutreffende Ergebnisse zu liefern /7, 25, 27/. In dem für diese Arbeit vorgegebenen Rahmen konnten hierzu keine abschließenden Ergebnisse erarbeitet werden. Dies bleibt einer weiterführenden Arbeit vorbehalten.

Das nachfolgend vorgestellte Näherungsverfahren wird deshalb als vorläufig bezeichnet, weil die Erfassung der Platten- und Scheibenbeanspruchung dabei noch getrennt mit jeweils auf der sicheren Seite liegenden Annahmen erfolgt. Von einem endgültigen Näherungsverfahren, bei dem die Nachgiebigkeit der Stützung entlang der Knicklinien wirklichkeitsnah erfaßt wird, ist dagegen zu erwarten, daß der Beanspruchungszustand von Treppen umfassend in einem Berechnungsgang an einem gemeinsamen Tragmodell bestimmt werden kann. Trotz der derzeit noch notwendigen Vereinfachungen sind allerdings auch schon bei Anwendung des hier mitgeteilten Berechnungsvorschlages deutliche Einsparungen bei Treppenkonstruktionen zu erzielen. Die zur Ermittlung der Platten- und Scheibenbeanspruchung erforderlichen Berechnungsschritte werden nachfolgend kurz erläutert.

8.2 Bestimmung der Plattenbeanspruchung

Mit dem vorläufigen Näherungsverfahren kann im Hinblick auf einen möglichst einfachen Rechenablauf zur Bestimmung der Plattenbeanspruchung von einer getrennten Schnittgrößenermittlung für die Podeste und Läufe an den statischen Systemen der Einzelbauteile ausgegangen werden. Die Beanspruchung im Verbindungsbereich von Lauf und Podest an der Knicklinie muß dann über auf der sicheren Seite liegende ergänzende Annahmen erfaßt werden, um auch hier hinsichtlich des Gebrauchs- und Bruchzustandes eine konstruktiv einwandfreie Bewehrungsführung zu erreichen. Bei Betrachtung dieser Voraussetzungen ergibt sich für das vorläufige Näherungsverfahren folgender Ablauf zur Ermittlung der Plattenbiegemomente:

- Ermittlung der Belastung

Die Belastung wird auf die Grundrißprojektion des Treppensystems bezogen

- Ermittlung der Schnittgrößen für die Läufe

Hierbei kann an den Knicklinien eine starre Stützung angenommen werden; die bisher gelegentlich vorgenommene rechnerische Verschiebung der Auflagerpunkte in die Podestplatte sollte Systemen vorbehalten bleiben, bei denen eine geringfügige Nachgiebigkeit der Auflagerlinie - z.B. bei Ver-

wendung von Elastomerlagern - zu erwarten ist. Die Stützweite in Längsrichtung des Systems entspricht damit in der Regel der Länge in der Grundrißprojektion des Laufs. Ist der Lauf nicht mit der seitlichen Wand verbunden, so erhält man als statisches System einen eingespannten Träger. Bei Verbindung des Laufs mit der Seitenwand ergibt sich eine dreiseitig gelagerte Platte. Schwierigkeiten bei der Berechnung dieser Systeme bereitet lediglich die Abschätzung der Einspannung in die angrenzenden Podestplatten. Als einfachste auf der sicheren Seite liegende Möglichkeit kann die Annahme gelenkiger Lagerung für die Berechnung der Momente im Feld angesehen werden. Für die Bestimmung der Momente an der Knicklinie kann demzufolge eine Volleinspannung unterstellt werden. Eine bessere Erfassung des wirklichen Momentenverlaufs ist schon durch die näherungsweise Anpassung dieser Grenzwerte zu erreichen. Beim System des einfachen Trägers auf zwei Stützen wird die Bemessung daher häufig mit den Werten $M \approx 0,1 \cdot q \cdot l^2$ für die Einspann- und Feldmomente durchgeführt.

- Ermittlung der Schnittgrößen für die Podeste

Die experimentellen und rechnerischen Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, daß die Podeste nicht zusätzlich zu den direkt auf ihrer Grundfläche wirkenden Lasten durch eine Linienlast aus den Auflagerkräften belastet werden. Die Läufe tragen vielmehr durch ihre Scheibenwirkung zu einer Abstützung der Podeste bei.

Da diese Abstützung, wie bereits oben erläutert, nicht starr ist und neben der Laufneigung, dem Bewehrungsgrad der Läufe, den Laufabmessungen und den Materialeigenschaften von Beton und Stahl auch entscheidend von der horizontalen Abstützung der Podeste abhängt, ist eine zutreffende Erfassung all dieser Einflüsse nur schwer möglich. Für die Näherungsberechnung der Podeste wird daher empfohlen, auf die Berücksichtigung der Abstützung gegenüber den Gleichlasten auf den Podesten zunächst zu verzichten und die Stützung nur über den Fortfall der Randlinienlasten und -momente aus den Läufen zu erfassen. Der Podestrand, in den die Läufe einbinden, kann dabei auf der sicheren Seite liegend als freier Rand betrachtet werden.

Dieser Fortfall der Linienlast aus der Auflagerung der Läufe ist bereits als wesentlicher Vorteil gegenüber den bisher gebräuchlichen Näherungsberechnungen, bei denen keine Faltwerk-wirkung unterstellt wurde, anzusehen. Die Abtragung dieser Randlasten wird dabei der Scheibentragwirkung zugewiesen. Die Einspannung des Podestes in die Läufe muß durch konstruktive Fortführung der für die Läufe ermittelten Einspannbewehrung im Podest jedoch ergänzend berücksichtigt werden.

8.3 Erfassung der Scheibenbeanspruchung

Die in den Bildern 48 und 50 mitgeteilten Verläufe der rechnerisch ermittelten Hauptspannungen haben die Bedeutung der Scheibentragwirkung für das Tragverhalten der in dieser Arbeit untersuchten Treppen bestätigt und den Verlauf aufgezeigt. Sie verdeutlichen darüberhinaus den großen Einfluß der Anordnung der horizontalen Festhaltungen und lassen erkennen, daß die Scheibentragwirkung in den Läufen zu einer ausgeprägteren Beanspruchung führt als in den Podesten

Da die Abstützung durch die Läufe an der Knicklinie bei der Schnittgrößenermittlung für die Podeste nach den Vereinfachungen des Abschnitts 8.2 nicht berücksichtigt wird, liegt die mit diesen Schnittgrößen ermittelte Bewehrung so weit auf der sicheren Seite, daß sie auch die aus der Scheibenbeanspruchung entstehenden Hauptzugspannungen aufnehmen kann. In Sonderfällen, bei denen z.B. infolge nur punktueller horizontal unverschieblicher Podestauflagerung größere Beanspruchung zu erwarten sind, können die daraus entstehenden erhöhten Hauptzugspannungen an einfachen Modellen abgeschätzt werden. Ein rechnerischer Nachweis zur Aufnahme der Hauptzugspannungen in den Podesten ist bei diesem Näherungsverfahren für Treppen mit horizontaler Festhaltung der Auflagerlinien an allen Podesten nicht nötig.

Die Scheibenbeanspruchung führt auch zu Zugbeanspruchungen der Läufe durch Lasten, die aus dem jeweiligen unteren Podest über eine Zugstrebe an der Auflagerlinie des oberen Podestes aufgehängt werden. Die Größe dieser Kräfte kann auf der sicheren Seite liegend unter der Annahme einer starren Stützung entlang der Knicklinien ermittelt werden.

In diesem Zusammenhang sei noch ergänzend auf die Fälle hingewiesen, in denen eine Horizontalkraftaufnahme wegen fehlender Auflast über Reibung nicht immer möglich ist, z.B. in den oberen Bereichen von Treppenhäusern aus Mauerwerk. Die hier in Anhang B mitgeteilten Ansätze zur Bestimmung der Horizontalkräfte (siehe auch Abschnitt 8.4.2) erlauben eine Bestimmung der Scheibenbeanspruchung auch für solche Systeme, die nicht an allen Auflagerlinien horizontal unverschieblich gehalten sind. Bei den vergleichsweise geringen Lasten und dem üblicherweise großen Hebelarm parallel zur Plattenmittelebene ist die Scheibenbeanspruchung in der Regel auch von Systemen mit horizontal verschieblichen Zwischenpodesten aufzunehmen, wenn die Scheibenbeanspruchung in den nicht gehaltenen und den angrenzenden Bauteilen, über die entsprechende Kräfte zu den Festhaltungen geleitet werden können, nachgewiesen wird.

8.4 Berechnung der Auflagerkräfte

8.4.1 vertikale Auflagerkräfte

Neben den Beanspruchungen der untersuchten Treppensysteme sind auch die von den angrenzenden Bauteilen aufzunehmenden Kraftgrößen von besonderem Interesse. Im Hinblick auf die vertikalen Auflagerkräfte zeigen die in Bild 51 mitgeteilten rechnerischen Verläufe und die Versuchsergebnisse ausgeprägte Extremwerte an den Knicklinien. Als Ursache für diese Konzentration können die in den Bildern 48 und 50 erkennbaren Zug- und Druckstreben in den Läufen angesehen werden, die sich unmittelbar an den Knicklinien abstützen bzw. hier aufgehängt werden.

Unter der Annahme starrer Stützung an den Knicklinien kann ihre Größe auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt werden.

8.4.2 horizontale Auflagerkräfte

Die Ausnutzung der Faltwerkwirkung bei Treppen wird entscheidend durch die Möglichkeit zur Aufnahme der horizontalen Auflagerkräfte in den angrenzenden Bauteilen bestimmt. Diese Auflagerkräfte entstehen durch die Aufteilung der Vertikal-

kraft an den Knicklinien in Komponenten, die in Lauf- und Podestebene wirken. Ihre Aufnahme ist für die Abstützung der aus den Läufen und Podesten gebildeten Falten unerlässlich. Damit den bereits in Abschnitt 2.2.2 erläuterten Ansätzen von Fuchssteiner /13/ und Rosmann /26/ einfache und zutreffende Rechenverfahren für die Bestimmung der Horizontalkräfte zur Verfügung stehen, wird hier auf die Angabe eines eigenen Vorschlags verzichtet.

Um die Übertragung und Erweiterung dieser Beziehungen zur Horizontalkraftbeanspruchung auf Systeme mit unterschiedlichen horizontalen Auflagerbedingungen zu erleichtern, wird die Ableitung der erforderlichen Gleichungen für zwei charakteristische Auflagerungsvarianten im Anhang B angegeben.

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Forschungsarbeit soll zur Ableitung von Konstruktions- und Bemessungsregeln für gerade, gegenläufige Plattentreppen mit Läufen und Podesten beitragen, um das Trag- und Verformungsverhalten dieser Bauteile zukünftig mit größerer Wirklichkeitsnähe erfassen zu können. Die hierfür im Abschnitt 2 dieser Arbeit zusammengestellte Übersicht mit den derzeit in der Baupraxis gebräuchlichen Konstruktionsformen und Berechnungsverfahren hat gezeigt, daß deutliche Vereinfachungen und Einsparungen der Bewehrungsführung für die in dieser Arbeit behandelten Treppensysteme nur dann zu erzielen sind, wenn es gelingt, Möglichkeiten zur Ausnutzung der im Prinzip bekannten Faltwerkwirkung auch für die vergleichsweise komplizierten räumlichen Treppensysteme bereitzustellen.

Ausgehend von dieser Zielsetzung wurden zunächst zwei Traglastversuche in naturnahem Maßstab durchgeführt, deren Vorbereitung, Planung, Ablauf und Ergebnisse in den Abschnitten 3 bis 5 dieses Berichts ausführlich dargestellt und eingehend erläutert werden. Als wichtigstes Ergebnis kann aus diesem Teil der Arbeit hier zusammenfassend mitgeteilt werden, daß es gelungen ist, den günstigen Einfluß der Faltwerkwirkung an den Versuchskörpern nachzuweisen. Das umfangreiche die Versuche begleitende Meßprogramm gestattete darüberhinaus Aussagen zu allen für die Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens interessierenden Größen und unterstrich die Bedeutung des gemeinsamen Zusammenwirkens der Platten- und Scheibenbeanspruchungen, die für die Faltwerkwirkung als kennzeichnend anzusehen sind. Typische Merkmale der untersuchten Treppen konnten sowohl im Hinblick auf die Scheibentragwirkung als auch auf die Plattentragwirkung aufgezeigt werden. Dabei bestätigte sich, daß die Stützung der Treppensysteme entlang der Knicklinien bei Ausnutzung der Faltwerkwirkung maßgeblich von der als charakteristisch anzusehenden Scheibentragwirkung parallel zu den Plattenmittelebenen bestimmt wird.

Insbesondere um hierzu eine kontinuierliche Aufzeichnung des Spannungsverlaufs infolge der Scheibentragwirkung zu erhal-

ten, wurden ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen auch Berechnungen der Treppensysteme nach der FE-Methode vorgenommen. Die hierbei ermittelten rechnerischen Hauptspannungsverläufe ließen ausgeprägte Druck- und Zugspannungsfelder vorwiegend in den Treppenläufen erkennen und gaben somit wichtige Hinweise zur Ausbildung der Stützung an den Knicklinien und zu den daraus entstehenden Horizontalkräften.

Ein Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der rechnerischen Untersuchungen, die unter der Voraussetzung linear elastischen Werkstoffverhaltens erfolgt waren, führte zu der Feststellung, daß die Stützung der Treppensysteme entlang der Knicklinien mit diesen Annahmen zu starr eingeschätzt wird. Während damit jedoch hinsichtlich der Scheibentragwirkung auf der sicheren Seite liegende Horizontalkräfte und Scheibenspannungen errechnet werden, folgen aus der Überschätzung der Stützmomente senkrecht zu den Knicklinien zu kleine Biegemomente in den anderen Bauteilbereichen, z.B. parallel zum freien Rand der Podeste. Abweichungen zur unsicheren Seite sind daher für die Plattentragwirkung nicht auszuschließen, wenn die Nachgiebigkeit der Stützung nicht zutreffend erfaßt wird. Die dafür notwendigen theoretisch, rechnerischen Untersuchungen überschreiten den hier gesetzten Rahmen. Sie bleiben einer weiterführenden Arbeit vorbehalten, in der dann auch die steifigkeitsmindernden Einflüsse, vorwiegend die Rißbildung, genauer zu berücksichtigen sein werden.

Trotz dieser Einschränkung erlaubten die Ergebnisse der vorliegenden Forschungsarbeit die Ableitung eines vorläufigen Näherungsverfahrens, bei dem die Ermittlung der Scheiben- und der Plattenbeanspruchung jeweils an verschiedenen sehr weit vereinfachten Systemen vorgenommen wird, denen wiederum zur sicheren Seite hin orientierte Annahmen zugrunde liegen. Dazu kann als wichtiges Merkmal ausgeführt werden, daß für die Ermittlung der Scheibenbeanspruchung eine starre Stützung an den Knicklinien unterstellt wird und diese Stützung bei der Ermittlung der Plattenbeanspruchung vernachlässigt wird. Gegenüber den Verfahren, die nur die Plattentragwirkung ausnutzen, ist bei dem Näherungsverfahren nach dieser Arbeit zusätzlich ein Nachweis der Scheibenbeanspruchung und der Auf-

nahme der Horizontalkräfte in den angrenzenden Bauteilen erforderlich, um die Ausbildung der Faltwerkwirkung sicherzustellen. Dafür erlaubt dieser Nachweis und die so gewährleistete Scheibentragwirkung parallel zu den Plattenmittelebenen jedoch den Fortfall der Randlasten aus der Auflagerung der Läufe. Diese sind bei den derzeit gebräuchlichen Berechnungsverfahren für die hohen Bewehrungskonzentrationen an den Knicklinien verantwortlich. Bereits die Anwendung der in dieser Arbeit empfohlenen Näherungen läßt demnach deutliche Bewehrungseinsparungen und damit eine erhöhte Wirtschaftlichkeit beim Bau von Stahlbetontreppen erwarten. Erläuternde Beispielrechnungen wurden hierzu im Anhang B zusammengestellt.

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

K U R Z B E R I C H T

zum Forschungsvorhaben

"Baukostendämpfung bei Geschoßtreppen"

(Untersuchungen zu einer wirklichkeitsnahen Erfassung des
Tragverhaltens unter Berücksichtigung der Faltwerkwirkung)

Auftraggeber: Der Bundesminister für Raumordnung, Bau-
wesen und Städtebau, 5300 Bonn -
Bad Godesberg (Az.: B35-80 01 85 - 1/42)

Ausführende Stelle: Institut für Baustoffe, Massivbau und
Brandschutz der Technischen Universität
Braunschweig

Berichterstatter: o.Prof. Dr.-Ing. E.h. Dr.-Ing. K. Kordina
Dipl.-Ing. H.-H. Osteroth

Abgeschlossen: September 1987

1 Problemstellung und Zielsetzung

Stahlbetontreppen werden heute wegen der guten Raumausnutzung und der vergleichsweise einfachen Schalung sehr häufig als gerade, gegenläufige Plattentreppen mit Läufen und Podesten ausgeführt. Während jedoch für die architektonischen Belange solcher Konstruktionen langjährig abgesicherte Erfahrungswerte /3/ bestehen, fehlen bis heute geeignete Rechenansätze und Bemessungsregeln, die das Tragverhalten ausreichend wirklichkeitsnah beschreiben. Die derzeit in der Baupraxis vorherrschenden Annahmen zur Schnittgrößenermittlung solcher Treppensysteme unterstellen, daß die Belastung der Läufe an den

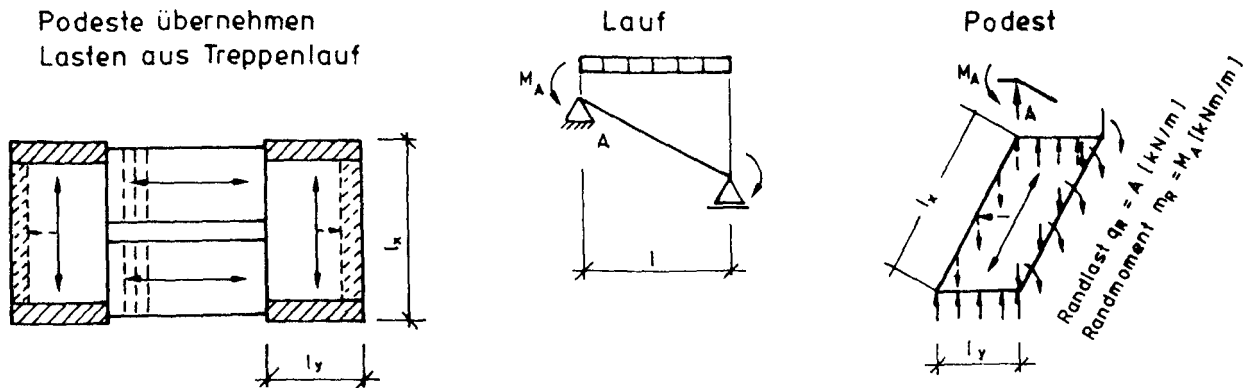


Bild 1: Treppensystem ohne Ausnutzung der Faltwerkwirkung;
aus den Läufen werden die Lasten als Randlinienlast
und -moment über Biegebeanspruchungen des Podestes
abgetragen /9/

Knicklinien zu den Podesten von einem Podestträger oder den Podesten selbst über Biegetragwirkung zu den Podestauflägern abgetragen wird. Da Podestträger meist unerwünscht sind, hat sich die Annahme der Lastabtragung über das Podest durchgesetzt. Sie führt mit Systemvorstellungen gemäß Bild 1 wegen der Randlinienmomente und -lasten aus den Läufen zu großen Biegebeanspruchungen der Podestplatten, weil Tragwirkungen infolge Scheibenbeanspruchungen parallel zu den Plattenmittelebenen vollständig vernachlässigt werden. Eine Ausnutzung dieser gemeinsamen Platten- und Scheibentragwirkung, die auch als Faltwerkwirkung bezeichnet wird, ergibt dagegen wesentlich günstigere Ergebnisse /1,4,8/. Ihre Entstehung aus der abgewinkelten Anordnung der Läufe gegenüber den Podesten erfordert dazu die Aufnahme von Horizontalkräften an den Auflagerlinien. Die vorliegende Arbeit soll zur wirklichkeitsnahen Erfassung dieser Tragwirkung in einfach anzuwendenden Konstruktionskonzepten beitragen. Als Ergebnis sind erhebliche Vereinfachungen und Einsparungen für die Bewehrung z.B. durch Fortfall von versteckten Unterzügen oder Bewehrungsverstärkungen in den Podesten zu erwarten.

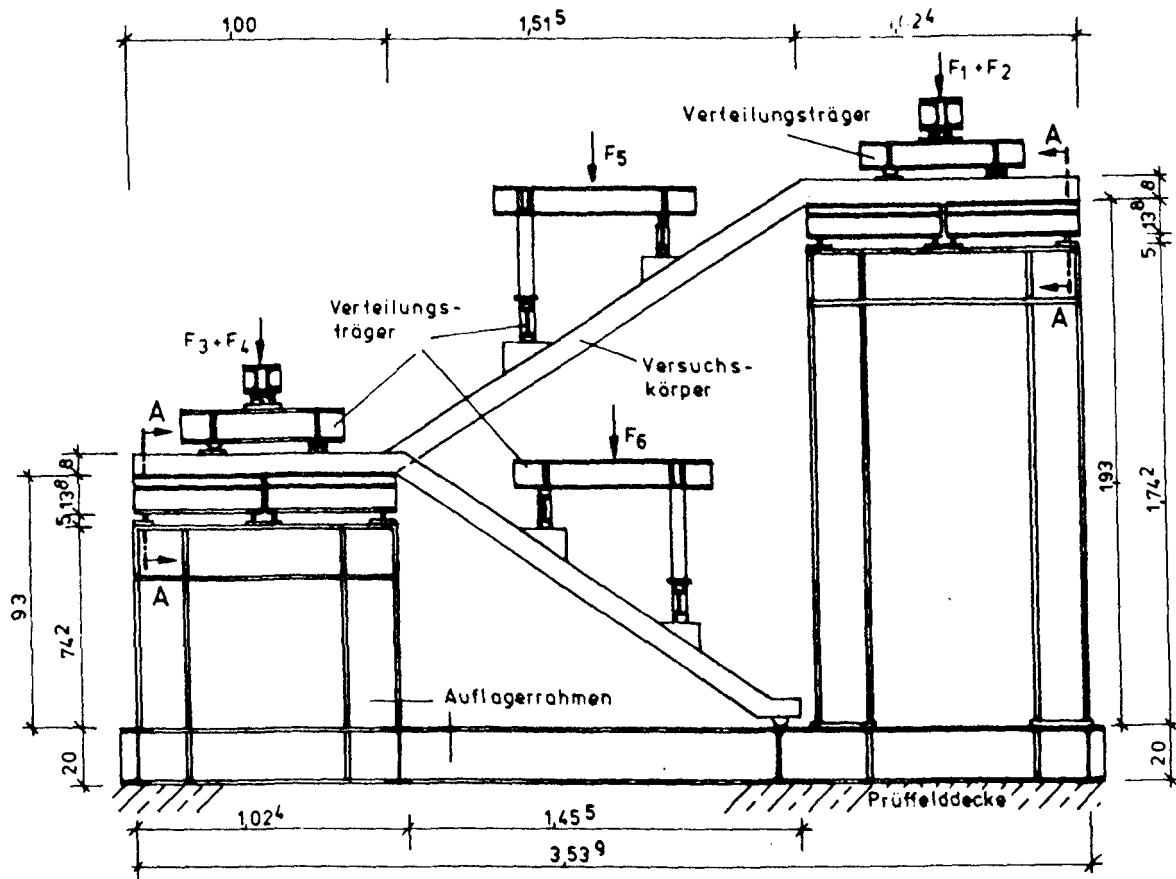


Bild 2: Schnitt durch den Versuchskörper mit Belastungseinrichtung und Auflagerahmen

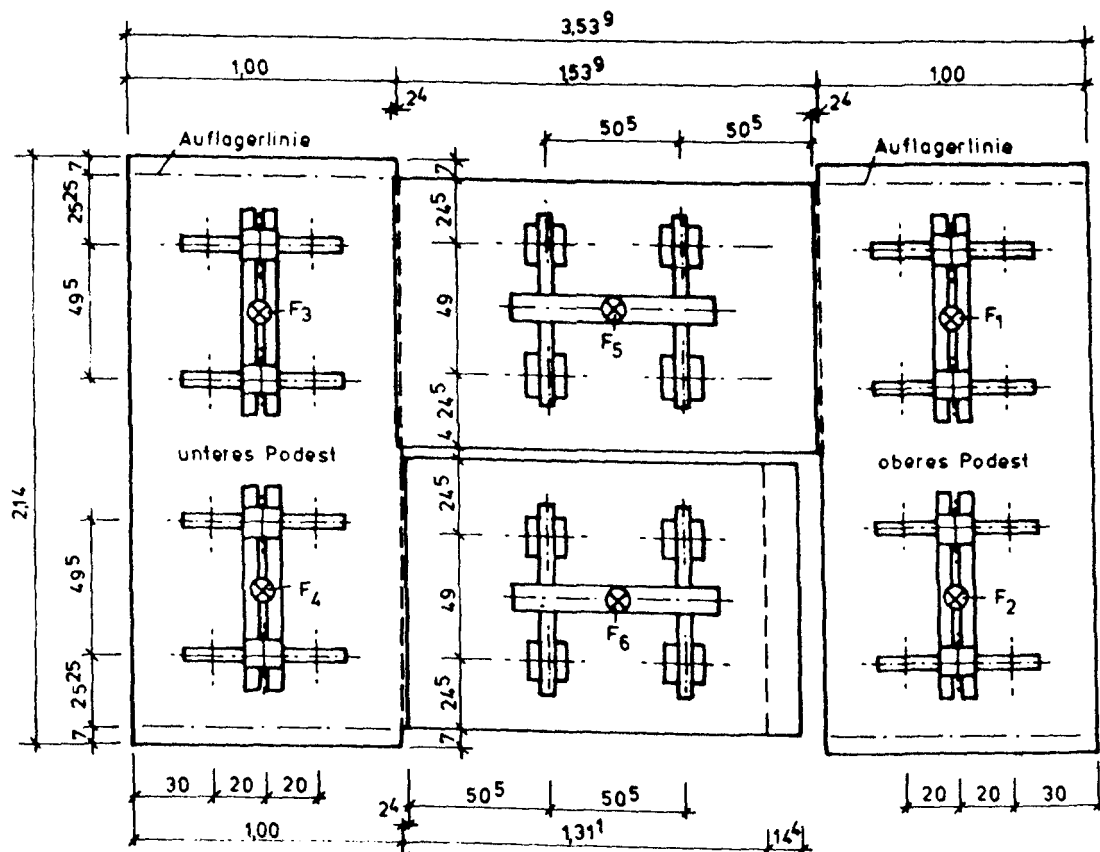


Bild 3: Grundriß des Versuchskörpers und Anordnung der Verteilungsträger für die Last

2 Durchführung der Forschungsarbeit

In der vorliegenden Forschungsarbeit erfolgte das Studium des Tragverhaltens ausgehend von einer Darstellung der bekannten Berechnungsverfahren und Tragmodelle zunächst im Rahmen einer umfangreichen experimentellen Untersuchung an zwei in naturnahem Maßstab verkleinerten Versuchskörpern, die in den Bildern 2 und 3 dargestellt sind. Die Belastung wurde an beiden Versuchskörpern nach mehreren Lastzyklen, in denen die Beanspruchung etwa dem bei Treppen zu erwartenden Gebrauchszustand entsprach, jeweils bis zum Eintritt des Versagenszustandes gesteigert. Das Formänderungsverhalten, die Stahl- und Betondehnungen, die Auflagerkräfte und die Rißentwicklung wurden dabei mit einem umfangreichen Meßprogramm aufgezeichnet, um alle für die Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens interessierenden Größen beschreiben zu können. Daneben wurden zu den Versuchen jedoch auch ergänzende rechnerische Untersuchungen mit dem FE-Programm SAP IV unter der Annahme linear elastischen Materialverhaltens an einem räumlichen System aus zwei Läufen und zwei Podesten durchgeführt. Diese Rechnungen sollten Hinweise zu Tragwirkungen und Parametern geben, die mit den Versuchen nicht umfassend erfaßt werden konnten. Vor allem der Verlauf und die Größenordnung der Scheibenspannungen, deren Aufzeichnung im Versuch bei Messungen mit Dehnmeßstreifen schwer zu bestimmenden Einflüssen aus der Rißbildung unterliegt, wurden mit den Ergebnissen der Rechnung genauer belegt.

3 Ergebnisse der Forschungsarbeit

Die Ergebnisse der vorliegenden Forschungsarbeit haben den günstigen Einfluß der Faltwerkwirkung auf das Tragverhalten von Treppen bestätigt. Da die Dehnsteifigkeit der stützenden Bauteile in den Plattenebenen größer ist als die Biegesteifigkeit senkrecht zu den Plattenebenen, führt die Ausnutzung der Faltwerkwirkung zu verminderten Formänderungen entlang der Knicklinien. Einen anschaulichen Eindruck der aus dieser Stützung zu erwartenden Traglasterhöhung vermittelt die in Tabelle 1 enthaltene Gegenüberstellung der Bruchlasten aus den Versuchen mit rechnerischen Ergebnissen, die an den Versuchskörpern entsprechenden Systemen bestimmt wurden.

Verfahren zur Bestimmung der Bruchlast	Bruchlast F_u
Näherungsverfahren <u>ohne</u> Ausnutzung der Faltwerkwirkung gemäß Bild 1	37,6 kN
linear, elastische <u>FE-Rechnung</u>	176,3 kN
Bruchlast in beiden <u>Versuchen</u>	142,5 kN

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Bruchlasten bei gemeinsamer Gleichlast auf allen Bauteilen

Dabei zeigt sich, daß die Traglast sehr weit unterschätzt wird, wenn man nur die Plattentragwirkung berücksichtigt. Darüberhinaus wird auch die Momentenverteilung und die Lage der am höchsten beanspruchten Bereiche falsch eingeschätzt. Während der Bruch in den Versuchen und bei Verfahren mit Ausnutzung der Faltwerkwirkung am oberen Podest entsteht, weil hier die Stützung der untersuchten Treppe insofern vermindert ist, als nur ein Lauf einbindet, wird der Bruchquerschnitt bei der Systemvorstellung nach Bild 1 in Feldmitte des unteren Podestes an der Knicklinie errechnet.

Neben den Bruchlasten konnten aus den Versuchsergebnissen sowohl zur Platten- als auch zur Scheibentragwirkung weitere wichtige Hinweise gewonnen werden. Da die Anordnung der Dehnmeßstreifen (DMS) bei der Versuchsplanung auf die erwartete Faltwerkwirkung abgestimmt worden war, belegen die Meßwerte, die mit den senkrecht zu den Knicklinien angeordneten DMS aufgenommen wurden, die Entstehung ausgeprägter Stützmomente. Mit diesen DMS wurden nahe der Knicklinien an der oberen Bewehrung Zugdehnungen aufgezeichnet, während mit den auf der Betonoberfläche angeordneten DMS gegenüberliegend an der Unterseite Stauchungen gemessen wurden. Diese aus den Dehnungen erkennbare Momentenverteilung ist als charakteristisch für ein Plattentragverhalten anzusehen, bei dem entlang der Knicklinien infolge der oben erläuterten Steifigkeitsverhältnisse verminderte Formänderungen auftreten. Die Ausbildung der Stützmomente ist damit ein wichtiger Hinweis auf die gleichzeitige Scheibentragwirkung, die darüberhinaus bei den Versuchen auch

von den Dehnungen der horizontalen Festhaltungen belegt wurde, aus denen nach vorheriger Eichung auch Horizontalkräfte errechnet werden konnten. Die Verteilung und Größenordnung dieser Kräfte bestätigte, daß die Stützung der Treppensysteme entlang der Knicklinien maßgeblich von der Scheibentragwirkung in den Läufen bestimmt wird.

Insbesondere im Hinblick auf eine kontinuierliche Aufzeichnung des Scheibenspannungsverlaufes konnten auch aus den Rechnungen wertvolle Ergebnisse entnommen werden. Die Hauptspannungsläufe ließen ausgeprägte Druck- und Zugspannungsfelder vorwiegend in den Treppenläufen erkennen und gaben somit wichtige Hinweise zur Stützung an den Knicklinien und den daraus entstehenden Horizontalkräften, aber auch zum Einfluß der Anordnung und Nachgiebigkeit der horizontalen Festhaltungen. Die rechnerische Momentenverteilung bestätigte die ausgeprägten Stützmomente senkrecht zu den Knicklinien. Bild 4 veranschaulicht den Verlauf für einen charakteristischen Schnitt.

Wichtige Rückschlüsse erlaubte darüberhinaus ein Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der rechnerischen Untersuchungen. Er führte zu der Feststellung, daß die unter der Voraussetzung linear elastischen Werkstoffverhaltens ermittelten Formänderungen die Stützung entlang der Knicklinien zu starr einschätzen. Während damit jedoch hinsichtlich der Scheibentragwirkung auf der sicheren Seite liegende Horizontalkräfte und Scheibenspannungen errechnet werden, folgt daraus eine Überschätzung der Stützmomente senkrecht zu den Knicklinien (siehe Bild 4) und eine Unterschätzung der Biegemomente in den anderen Bauteilbereichen, z.B. parallel zum freien Rand der Podeste. Abweichungen zur unsicheren Seite sind daher für die Plattentragwirkung nicht auszuschließen, wenn die Nachgiebigkeit der Stützung als zu starr angenommen wird. Wirklichkeitsnahe Ergebnisse sind demnach nur mit Verfahren zu erzielen, die den Einfluß der Rißbildung berücksichtigen, weil sich bei Treppen den stützenden Scheibenbeanspruchungen Biegetragwirkungen überlagern, aus denen bereits früh steifigkeitsmindernde Risse entstehen.

Obwohl die für eine Berücksichtigung dieses Einflusses notwendigen theoretisch, rechnerischen Untersuchungen erst im Rahmen

weiterführender Forschungsarbeiten abschließend durchgeführt werden können, erlaubten auch schon die jetzt vorliegenden Ergebnisse eine Zusammenstellung vereinfachter Empfehlungen zur näherungsweise Berücksichtigung der Faltwerkswirkung bei geraden, gegenläufigen Plattentreppen aus Stahlbeton. Wegen der Einschränkungen hinsichtlich einer umfassenden Berücksichtigung der Rißbildung erfolgt die Ermittlung der Scheiben- und Plattenbeanspruchung nach diesen Näherungen jeweils an verschiedenen sehr weit vereinfachten Systemen, denen zur sicheren Seite orientierte Annahmen zugrunde liegen. Dazu kann als wichtiges Merkmal ausgeführt werden, daß für die Ermittlung der Scheibenbeanspruchung eine starre Stützung an den Knicklinien unterstellt wird und diese Stützung bei der Ermittlung der Plattenbeanspruchung vernachlässigt wird.

Gegenüber den Verfahren, die nur die Plattentragwirkung ausnutzen /2,5,6/, ist bei dem Näherungsverfahren nach dieser Arbeit zusätzlich ein Nachweis der Scheibenbeanspruchung und der Aufnahme der Horizontalkräfte in den angrenzenden Bauteilen erforderlich, um die Ausbildung der Faltwerkswirkung sicherzustellen. Mit der Annahme starrer Lagerung an den Knicklinien konnte für die Berechnung der Horizontalkräfte auf einfache Modellvorstellungen aus /4,7/ verwiesen werden. Mit den für die wichtigsten Lagerungsfälle zusammengestellten Bestimmungsgleichungen, die auch leicht erweitert werden können, ist der Nachweis der Scheibenbeanspruchung und der daraus resultierenden Horizontalkräfte unmittelbar möglich. Als wesentlicher Vorteil dieses zusätzlichen Nachweises und des damit geringfügig erhöhten Rechenaufwandes erlaubt dieser Nachweis und die so gewährleistete Scheibentragwirkung parallel zu den Plattenmittelebenen den Fortfall der Randlasten aus der Auflagerung der Läufe bei der Schnittgrößenermittlung für die Podeste. Diese sind bei den derzeit gebräuchlichen Berechnungsverfahren für die hohen Bewehrungskonzentrationen an den Knicklinien verantwortlich. Bereits die Anwendung der in dieser Arbeit empfohlenen einfachen Näherungen läßt somit deutliche Bewehrungseinsparungen und damit eine erhöhte Wirtschaftlichkeit beim Bau von Stahlbetontreppen erwarten.

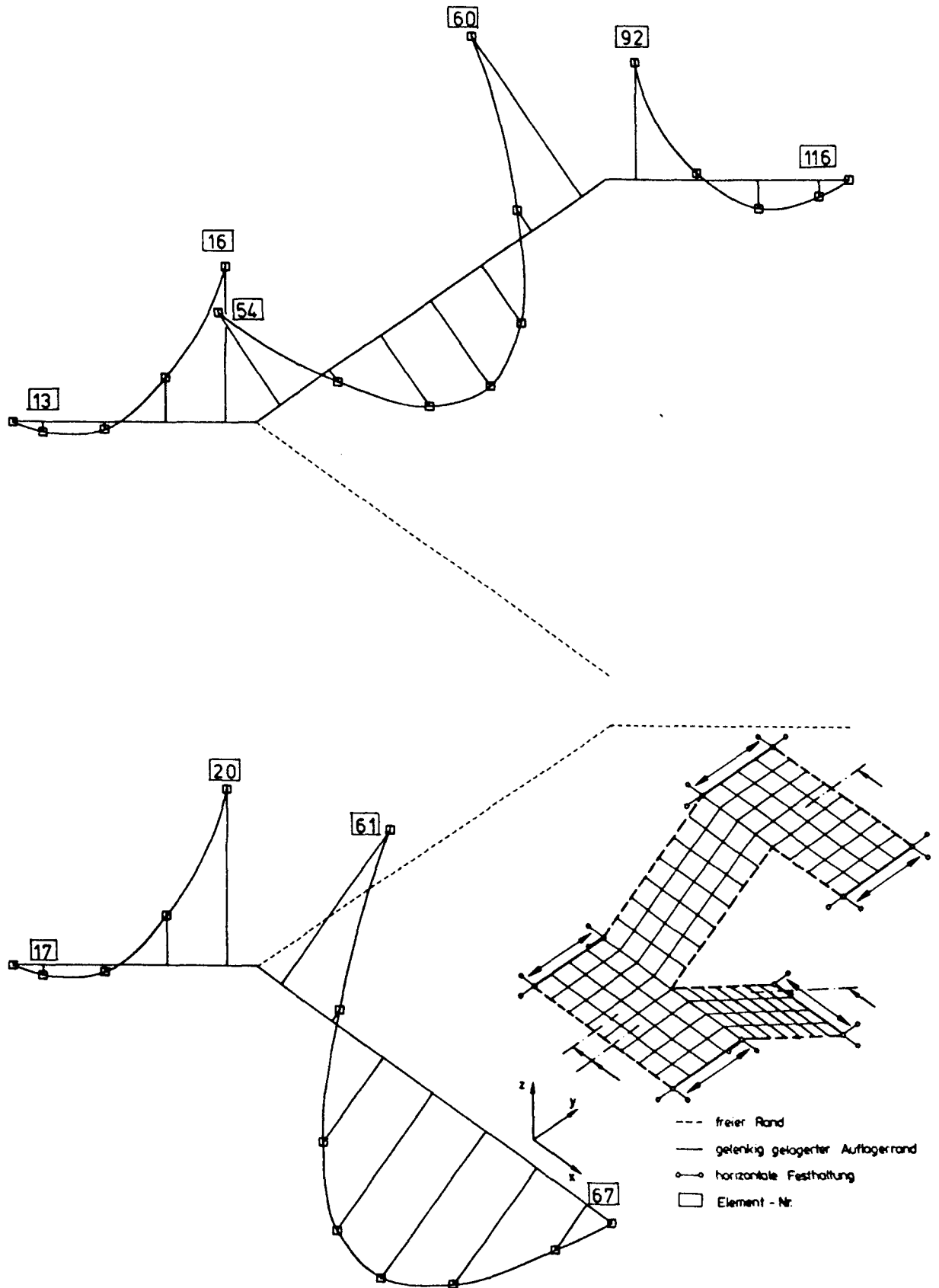


Bild 4: Rechnerisch am räumlichen System ermittelter Verlauf der Momente m_y

Literaturverzeichnis

- /1/ Born, J.
Berechnung einer einläufigen Treppe als Faltwerk.
Bauwelt 51, Heft 22, 1960, S. 631

- /2/ Freihart, G.
Die Berechnung der trägerlosen, geraden Podesttreppe.
Beton- und Stahlbetonbau 50, 12, 1955, S. 318-319

- /3/ Fuchs, N.
Konstruktion von zweiläufigen Stahlbetonpodesttreppen mit
gemeinsamen Bruchkanten. Deutsches Architektenblatt,
Ausg. Baden-Württemberg 10, 9, 1977, S. 857-858

- /4/ Fuchssteiner, W.
Treppen. Betonkalender 1965, Bd. II, S. 51-84,
Verlag W. Ernst + Sohn, Berlin, 1965

- /5/ Funke, L.
Die elastische Einspannung gerader Treppenläufe in
trägerlosen Podestplatten.
Der Bauingenieur 32, 3, 1957, S. 90-92

- /6/ Koseoglu, S.
Treppen. Betonkalender 1980, Bd. II, S. 901-1034,
Verlag W. Ernst + Sohn, Berlin, 1980

- /7/ Rosmann, R.
Plattentreppen.
Deutsche Bauzeitung 30, 9, 1982, S. 1259-1274

- /8/ Suenson, E.
Trägerlose Eisenbetontreppen.
Beton und Eisen 19, 1937, S. 308-368

- /9/ Wommelsdorf, O.
Stahlbetonbau, Bemessung und Konstruktion, Teil 2,
1. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1973

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

S H O R T R E P O R T

on the Research Project

"Building cost reduction of stairways"

(Investigations into a realistic assessment of the load-carrying behaviour with regard to the folded plate structures)

Commissioned by: Der Bundesminister für Raumordnung, Bau-
wesen und Städtebau, 5300 Bonn -
Bad Godesberg (Az.: B35-80 01 85 - 1/42)

Place of Research: Institut für Baustoffe, Massivbau und
Brandschutz der Technischen Universität
Braunschweig

Report by: o.Prof. Dr.-Ing. E.h. Dr.-Ing. K. Kordina
Dipl.- Ing. H.-H. Osteroth

Project finished: September 1987

1 Problems and Scope

As a result of the good utilization of space and the comparatively simple formwork, reinforced concrete stairways very often consist of straight, oppositely directed runs with intermediate platforms (landings). Whereas for the architectural features of such a construction long standing empirical values exist, there is a singular lack of appropriate design rules which are capable of realistically assessing the load-carrying behaviour. The present prevalent assumptions for the struc-

tural analysis of such stairways in construction engineering assume that the loads on the runs are carried by a reinforced concrete beam at the edge of the platforms or by the platforms themselves. As a reinforced concrete beam at the edge of the platform is normally undesired, a load carrying system within the platform is now generally assumed. This results, as a consequence of the high edge moments and linear loads, in a high bending strain of the platform slab, because all load-carrying effects parallel to the median planes of the slabs are completely neglected. Substantially more favourable results are obtained when the folded plate effect is considered, which originates from the angular arrangement of the runs against the platforms, and takes not only the plate action but also the plane action into account. The aim of the present study is to contribute to a realistic assessment of this load carrying action within simply applicable design concepts. Therefore the load-carrying behaviour of two full scale test specimens consisting of two runs and two platforms, loaded until failure occurred, was studied. At the same time additional calculations on the basis of the finite element method were carried out.

2 Summary of the Test Results

The most important result of the experimental part of this study was the proof of the favourable influence on both test specimens of the folded plate action. The accompanying measuring program allowed statements for all interesting values for the assessment of the load-carrying and deformation behaviour. Typical features of the tested stairways could be shown for the slab as well as the plate-carrying action. It could be confirmed, that, by using the folded plate action, the support at the joint between runs and platforms is determined by the plate action parallel to the median planes within the runs. Especially for the tension and compression stress

fields within the runs, valuable results have also been obtained from the numerical investigations, since this allowed the continuous determination of the stress fields. Moreover, on the basis of the computed stresses, the importance of a horizontally fixed support in order to transmit the horizontal forces was verified.

A comparison of the test results with the results of the numerical studies, which were carried out on the basis of a linear-elastic material behaviour, showed that, with this assumption, the support at the joint between the runs and the platforms is estimated as too rigid. Only methods which take the cracking of the concrete into account are able to appropriately describe the load-carrying system. Although the necessary theoretical and numerical studies can only be carried out within the scope of further research work, the present results already allow a compilation of simplified design recommendations for an approximate consideration of the folded plate effect for stairways with straight, oppositely directed runs and intermediate platforms. By using this simple approximation, considerable savings in reinforcement and an improved design practice can already be expected.

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

"Baukostendämpfung bei Geschoßtreppen"

A N H A N G A

zum

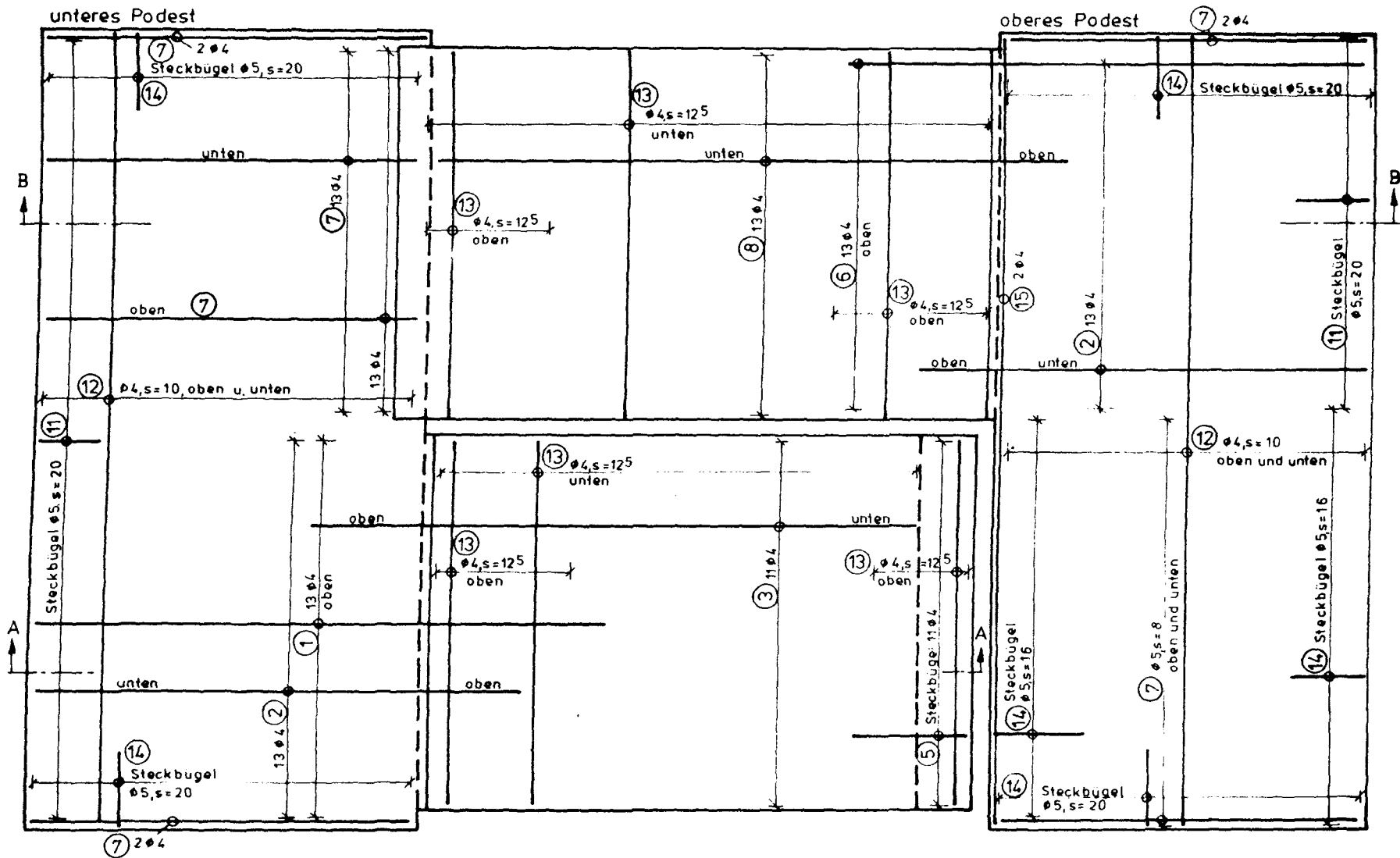
A B S C H L U S S B E R I C H T

Angaben zum Versuchsaufbau und
Darstellung der Versuchsergebnisse

Bericht erstattet von
o.Prof. Dr.-Ing.E.h. Dr.-Ing. K. Kordina
Dipl.-Ing. H.-H. Osteroth

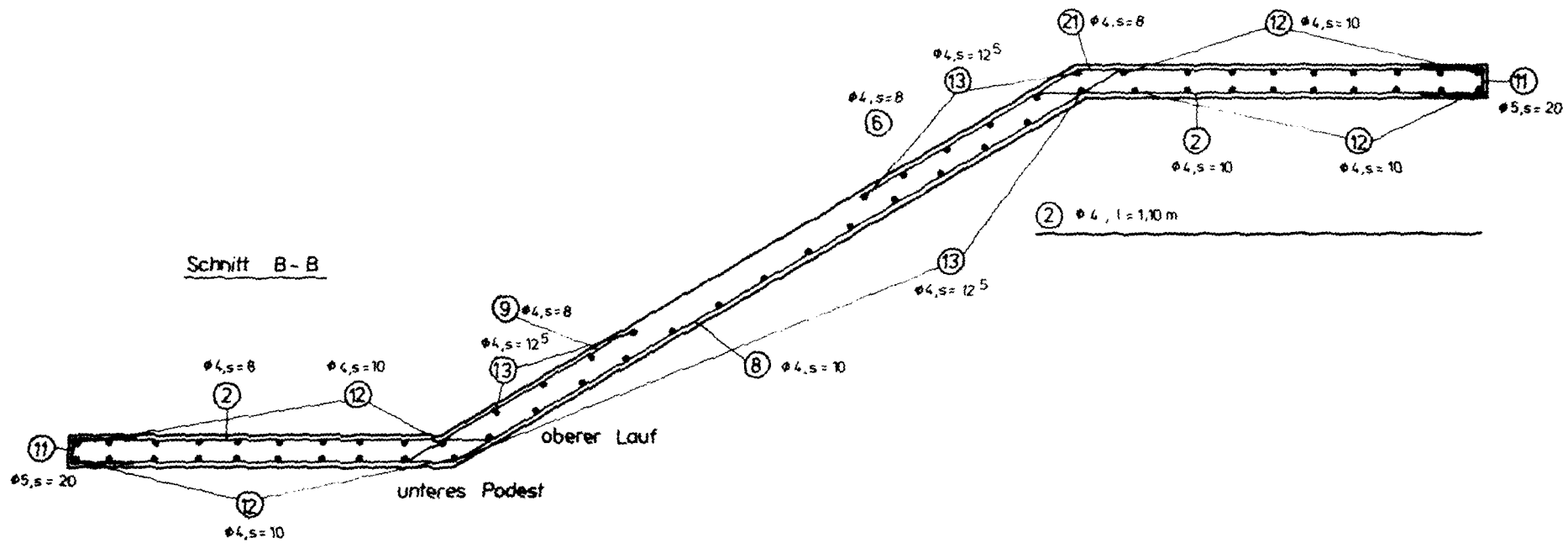
Braunschweig im September 1987

Das Forschungsvorhaben wurde im Auftrage des Bundesministeriums
für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn - Bad Godesberg
durchgeführt. (Az.: B15 - 80 01 85 - 3)

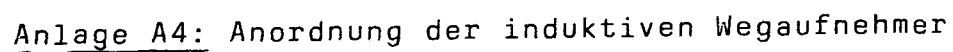


- A1 -

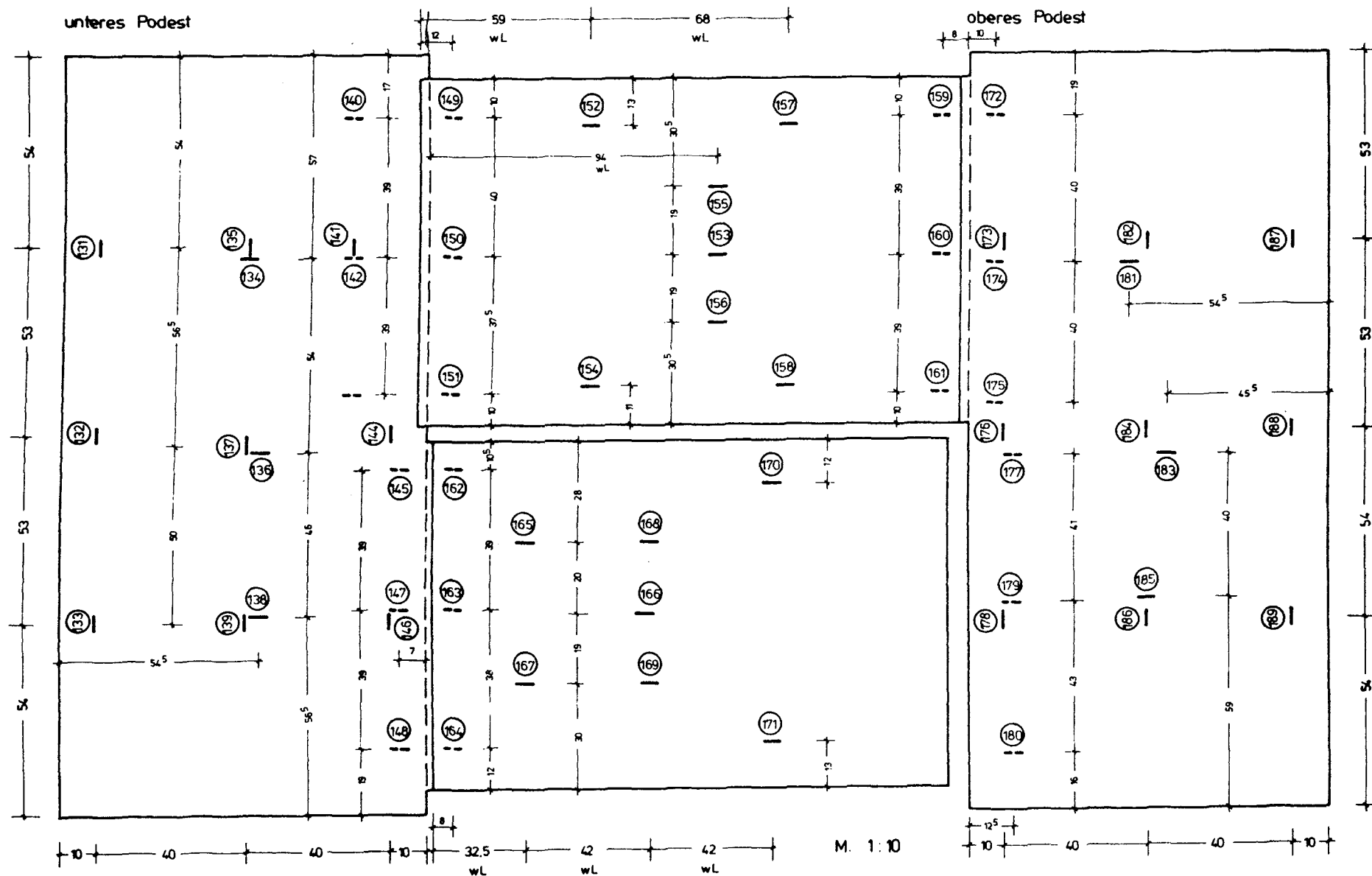
Anlage A1: Bewehrung des Versuchskörpers Treppe 1
(Treppe 2 analog)



Anlage A3: Bewehrung des Versuchskörpers Treppe 2 im Schnitt B - B

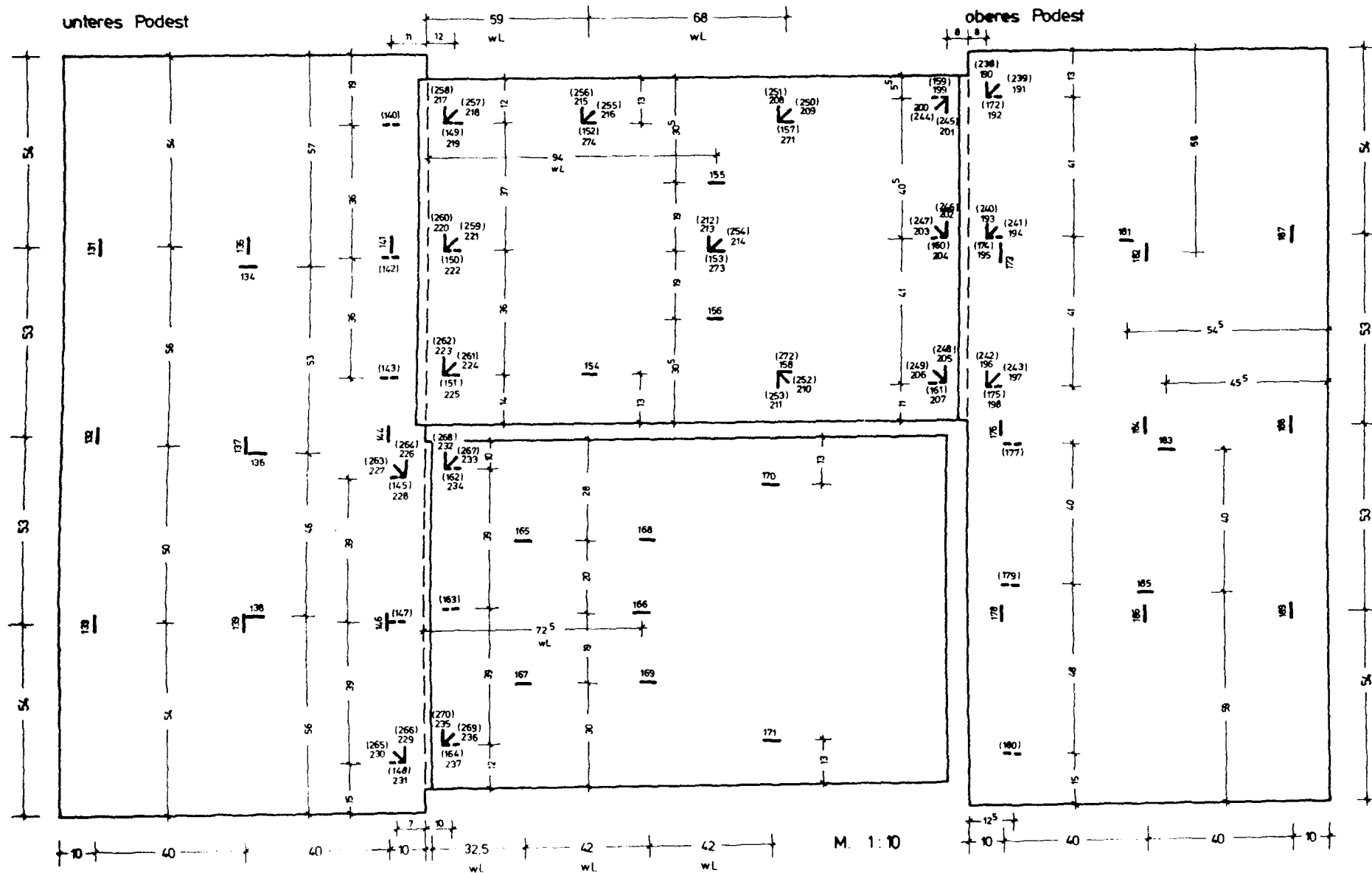


wL wahre Länge
 ——— Beton - DMS Oberserie
 - - - Beton - DMS Unterserie

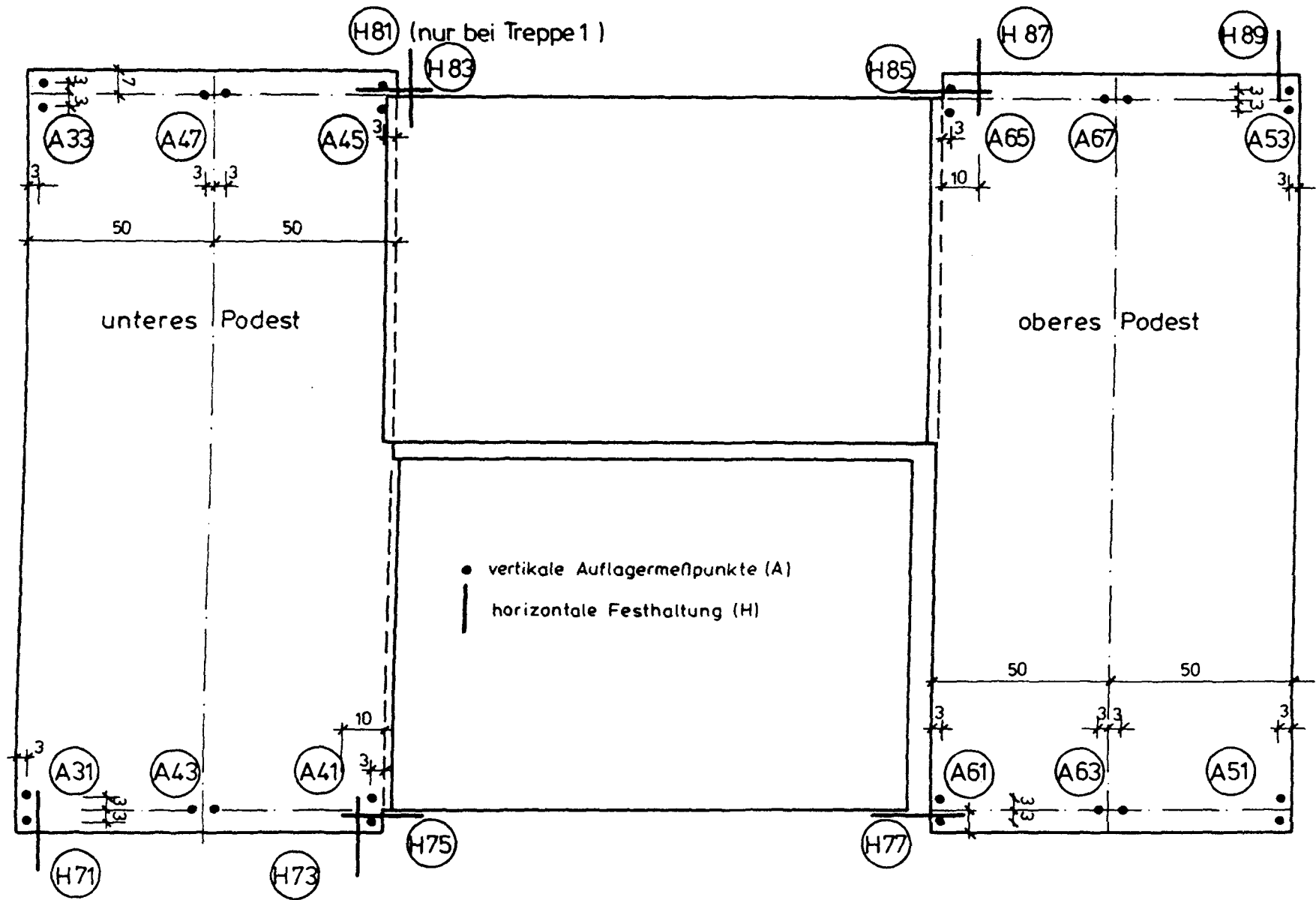


Anlage A5: Lage der Dehnmeßstreifen (DMS) bei Treppe 1

wL wahre Länge
 ——— Beton - DMS Oberserte
 - - - Beton - DMS Unterserte



Anlage A6: Lage der Dehnmeßstreifen (DMS) bei Treppe 2



Laststufe	Tag	Beginn	F ₁ + F ₂ oberes Podest	F ₃ + F ₄ unteres Podest	F ₅ oberer Lauf	F ₆ unterer Lauf	F _{ges}	Bemerkungen
			kN	kN	kN	kN	kN	
0	24.02.86	14.45	-	-	-	-	-	
1		15.11	-	-	-	0,36	0,36	
2		15.40	-	-	-	1,5	1,5	
3		15.45	-	-	-	3,0	3,0	
4		15.50	-	-	-	4,5	4,5	
5		15.58	-	-	-	6,0	6,0	
6		16.02	-	-	-	7,5	7,5	
7		16.08	-	-	-	9,0	9,0	
8		16.18	-	-	-	10,5	10,0 ⁵	
9		16.24	-	-	-	12,0	12,0	
10		16.39	-	-	-	13,5	13,5	
11		16.58	-	-	-	15,0	15,0	
12		17.04	-	-	-	16,5	16,5	
13		17.19	-	-	-	0	0	
14	25.02.86	7.55	0	0	0	0	0	Rißmessung
15		8.39	-	0,73	-	-	0,73	
16		9.08	-	4,0	-	-	4,0	
17		9.34	-	6,0	-	-	6,0	
18		10.00	-	8,0	-	-	8,0	
19		10.58	-	10,0	-	-	10,0	
20		11.12	-	12,0	-	-	12,0	
21		11.19	-	14,0	-	-	14,0	
22		11.32	-	0	-	-	0	
23	26.02.86	7.54	-	-	0	-	0	
24		8.25	-	-	0,35	-	0,35	
25		8.35	-	-	3,0	-	3,0	
26		8.40	-	-	6,0	-	6,0	
27		8.47	-	-	7,5	-	7,5	
28		8.53	-	-	9,0	-	9,0	
29		9.02	-	-	10,5	-	10,5	
30		9.08	-	-	12,0	-	12,0	
31		9.14	-	-	13,5	-	13,5	
32		9.32	-	-	0	-	0	
33	26.02.86	11.09	0,73	-	-	-	0,73	Anriß
34		11.31	2,0	-	-	-	2,0	
35		11.41	4,0	-	-	-	4,0	
36		11.49	6,0	-	-	-	6,0	
37		11.58	8,0	-	-	-	8,0	
38		12.05	10,0	-	-	-	10,0	
39		12.12	12,0	-	-	-	12,0	
40		12.14	0	-	-	-	0	
41	26.02.86	14.27	-	0	-	-	0	Rißmessung
42		14.45	-	4,0	-	3,0	7,0	
43		14.57	-	6,0	-	4,5	10,5	
44		15.02	-	8,0	-	6,0	14,0	
45		15.44	-	10,0	-	7,5	17,5	
46		16.32	-	0	-	0	0	

Laststufe	Tag	Beginn	F ₁ + F ₂ oberes Podest	F ₃ + F ₄ unteres Podest	F ₅ oberer Lauf	F ₆ unterer Lauf	F _{ges}	Bemerkungen
			kN	kN	kN	kN	kN	
47	27.02.86	7.50	0	-	0	-	0	
48		8.46	4,0	-	3,0	-	7,0	
49		8.54	6,0	-	4,5	-	10,5	
50		9.02	8,0	-	6,0	-	14,0	
51		9.34	10,0	-	7,5	-	17,5	
52		10.05	10,0	-	9,0	-	19,0	Rißmessung
53		10.24	10,0	-	10,5	-	20,5	
54		10.34	10,0	-	12,0	-	22,0	
55		11.04	10,0	-	7,5	-	17,5	
56		11.11	6,0	-	4,5	-	10,5	
57		11.18	0	-	0	-	0	
58	27.02.86	11.55	4,0	4,0	3,0	3,0	14,0	Rißmessung
59		12.01	6,0	6,0	4,5	4,5	21,0	
60		12.08	8,0	8,0	6,0	6,0	28,0	
61		12.14	10,0	10,0	7,5	7,5	35,0	
62		12.18	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	*)
63		13.19	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	t= 1,00 h
64		16.30	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	t= 4,17 h
65	28.02.86	8.28	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	t=20,17 h
66		12.17	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	t=23,97 h
67		17.00	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	t=28,70 h
68	01.03.86	12.00	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	t=47,70 h
69	02.03.86	12.17	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	t=71,98 h
70	03.03.86	9.24	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	t=93,00 h
71		9.30	10,0	10,0	7,5	7,5	35,0	
72		9.37	6,0	6,0	4,5	4,5	21,0	
73		9.42	0	0	0	0	0	
74		11.28	0	0	0	0	0	
75		11.52	6,0	6,0	4,5	4,5	21,0	Bruchlast- zyklus 1
76		11.58	8,0	8,0	6,0	6,0	28,0	
77		12.02	10,0	10,0	7,5	7,5	35,0	
78		12.07	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	
79		12.14	14,0	14,0	10,5	10,5	49,0	
80		12.18	16,0	16,0	12,0	12,0	56,0	
81		13.05	16,0	16,0	12,0	12,0	56,0	Rißmessung
82		13.23	18,0	18,0	13,5	13,5	63,0	
83		13.30	20,0	20,0	15,0	15,0	70,0	Rißmessung
84		14.23	22,0	22,0	16,5	16,5	77,0	
85		14.31	24,0	24,0	18,0	18,0	84,0	Rißmessung
86		14.52	24,0	24,0	18,0	18,0	84,0	
87		15.12	26,0	26,0	19,5	19,5	91,0	Rißmessung
88		16.14	28,0	28,0	21,0	21,0	98,0	
89		16.22	30,0	30,0	22,5	22,5	105,0	Rißmessung
90		16.30	32,0	32,0	24,0	24,0	112,0	
91		16.36	34,0	34,0	25,5	25,5	119,0	
92		16.41	34,0	34,0	25,5	25,5	119,0	
93		16.46	36,0	36,0	27,0	27,0	126,0	
94		16.52	26,0	36,0	27,0	27,0	116,0	
95		17.02	0	0	0	0	0	

*) Standzeit der Last

- A8.3 -

Laststufe	Tag	Beginn	F ₁ + F ₂ oberes Podest	F ₃ + F ₄ unteres Podest	F ₅ oberer Lauf	F ₆ unterer Lauf	F _{ges}	Bemerkungen
			kN	kN	kN	kN	kN	
96	04.03.86	7.40	0	0	0	0	0	
97		8.04	-	6,0	-	4,5	10,5	
98		8.08	-	10,0	-	7,5	17,5	
99		8.11	-	14,0	-	10,5	24,5	
100		8.17	-	18,0	-	13,5	31,5	
101		8.22	-	22,0	-	16,5	38,5	
102		8.25	-	26,0	-	19,5	45,5	
103		8.35	-	26,0	-	19,5	45,5	
104		8.39	-	30,0	-	22,5	52,5	
105		8.43	-	34,0	-	25,5	59,5	
106		8.47	-	38,0	-	28,5	66,5	
107		10.50	-	38,0	-	28,5	66,5	
108	04.03.86	10.53	-	0	-	0		Bruchlast- zyklus 2
109		11.47	-	0	-	0		
110		11.52	-	18,0	-	13,5	31,5	
111		11.54	-	30,0	-	22,5	52,5	
112		11.58	-	38,0	-	28,5	66,5	
113		12.04	-	42,0	-	31,5	73,5	
114		12.07	-	46,0	-	34,5	80,5	
115		12.12	-	50,0	-	37,5	87,5	
116		12.15	-	54,0	-	40,5	94,5	
117		12.19	-	58,0	-	43,5	101,5	
118		12.22	-	62,0	-	46,5	108,5	
119		12.30	-	0	-	0	0	
120		13.30	-	0	-	0	0	

Anlage A8: Versuchsablauf Treppe 1

Laststufe	Tag	Beginn	F ₁ + F ₂ oberes Podest	F ₃ + F ₄ unteres Podest	F ₅ oberer Lauf	F ₆ unterer Lauf	F _{ges}	Bemerkungen
L			kN	kN	kN	kN	kN	
Ø	05.06.86	13.26	0	0	0	0	0	
1		13.45	-	0,73	-	0,35	1,1	
2		13.50	-	-	-	1,5	1,5	
3		14.02	-	-	-	3,0	3,0	
4		14.06	-	-	-	4,5	4,5	
5		14.11	-	-	-	6,0	6,0	
6		14.18	-	-	-	7,5	7,5	
7		14.26	-	-	-	9,0	9,0	
8		14.31	-	-	-	10,5	10,5	
9		14.38	-	-	-	12,0	12,0	
10		14.42	-	-	-	13,5	13,5	
11		14.47	-	-	-	15,0	15,0	
12		14.52	-	-	-	16,5	16,5	
13 ¹⁾		15.30	-	-	-	"	"	
14		15.34	-	-	-	0	0	
15	05.06.86	15.53	-	4,0	-	-	4,0	
16		15.58	-	6,0	-	-	6,0	
17		16.04	-	8,0	-	-	8,0	
18		16.09	-	10,0	-	-	10,0	Rißmessung
19		16.12	-	12,0	-	-	12,0	Rißmessung
20		16.16	-	14,0	-	-	14,0	
21		16.21	-	16,0	-	-	16,0	
22		16.39	-	0	-	-	0	
23	06.06.86	7.56	0	0	0	0		
24		9.55	0,73	-	0,35	-	1,1	
25		10.48	0	0	1,5	0	1,5	
26		10.55	0	0	3,0	0	3,0	
27		11.03	0	0	4,5	0	4,5	
28		11.08	0	0	6,0	0	6,0	
29		11.12	0	0	7,5	0	7,5	
30		11.16	0	0	9,0	0	9,0	Rißmessung
31		11.20	0	0	10,5	0	10,5	Rißmessung
32		11.27	0	0	12,0	0	12,0	
33		11.35	0	0	13,5	0	13,5	
34		11.40	0	0	15,0	0	15,0	
35		11.48	0	0	16,5	0	16,5	
36		12.00	0	0	0	0	0	
37	06.06.86	13.39	2,0	0	0	0	2,0	
38		13.54	4,0	0	0	0	4,0	Rißmessung
39		14.0	6,0	0	0	0	6,0	Rißmessung
40		14.05	8,0	0	0	0	8,0	
41		14.11	10,0	0	0	0	10,0	
42		14.19	12,0	0	0	0	12,0	
43		14.29	0	0	0	0	0	
44		14.53	0	4,0	0	3,0	7,0	
45		15.07	0	6,0	0	4,5	10,5	
46		15.12	0	8,0	0	6,0	14,0	
47		15.20	0	10,0	0	7,5	17,5	
48		15.29	0	0	0	0	0	

Laststufe	Tag	Beginn	F ₁ + F ₂ oberes Podest	F ₃ + F ₄ unteres Podest	F ₅ oberer Lauf	F ₆ unterer Lauf	F _{ges}	Bemerkungen
L			kN	kN	kN	kN	kN	
49	06.06.86	15.43	4,0	0	3,0	0	7,0	Rißmessung Rißmessung Rißmessung Rißmessung
50		15.46	6,0	0	4,5	0	10,5	
51		15.53	8,0	0	6,0	0	14,0	
52		15.59	10,0	0	7,5	0	17,5	
53		16.03	10,0	0	9,0	0	19,0	
54		16.07	10,0	0	10,5	0	20,5	
55		16.11	10,0	0	12,0	0	22,0	
56		16.15	10,0	0	7,5	0	17,5	
57		16.18	6,0	0	4,5	0	10,5	
58		16.23	0	0	0	0	0	
59	09.06.86 10.06.86 11.06.86	10.55	0	0	0	0	0	*) t=1,0 h t=2,75 h t=17,43 h t=25,50 h t=42,25 h t=49,25 h
60		12.10	4,0	4,0	3,0	3,0	14,0	
61		12.18	6,0	6,0	4,5	4,5	21,0	
62 ¹⁾		13.56	"	"	"	"	"	
63		14.04	8,0	8,0	6,0	6,0	28,0	
64		14.19	10,0	10,0	7,5	7,5	35,0	
65		14.30	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	
66		15.30	"	"	"	"	"	
67		17.15	"	"	"	"	"	
68		7.55	"	"	"	"	"	
69		16.00	"	"	"	"	"	
70		8.45	"	"	"	"	"	
71		15.45	"	"	"	"	"	
72		15.54	10,0	10,0	7,5	7,5	35,0	
73		15.59	6,0	6,0	4,5	4,5	21,0	
74		16.10	0	0	0	0	0	
75	12.06.86	7.58	0	0	0	0	0	Bruchlast- zyklus 1
76		9.23	6,0	6,0	4,5	4,5	21,0	
77		9.32	8,0	8,0	6,0	6,0	28,0	
78		9.36	10,0	10,0	7,5	7,5	35,0	
79		9.42	12,0	12,0	9,0	9,0	42,0	
80		9.50	14,0	14,0	10,5	10,5	49,0	
81		9.56	16,0	16,0	12,0	12,0	56,0	
82		10.15	18,0	18,0	13,5	13,5	63,0	
83		10.23	20,0	20,0	15,0	15,0	70,0	
84		11.09	22,0	22,0	16,5	16,5	77,0	
85		11.14	24,0	24,0	18,0	18,0	84,0	
86		11.41	26,0	26,0	19,5	19,5	91,0	
87		11.48	28,0	28,0	21,0	21,0	98,0	
88		12.20	30,0	30,0	22,5	22,5	105,0	
89		12.28	32,0	32,0	24,0	24,0	112,0	
90		13.02	34,0	34,0	25,5	25,5	119,0	
91		13.09	36,0	36,0	27,0	27,0	126,0	
Versagen im unteren Treppenauge								
92		13.39	0	0	0	0	0	
93		9.33	0	0	0	0	0	Bruchlast- zyklus 2
94		13.24	-	18,0	-	13,5	31,5	
95		13.28	-	38,0	-	28,5	66,5	
96		13.35	-	46,0	-	34,5	80,5	
97		13.40	-	54,0	-	40,5	94,5	
98		13.45	-	62,0	-	46,5	108,5	
99		13.50	-	66,0	-	49,5	115,5	
Biegebruch des unteren Laufes								
100		13.58	0	0	0	0	0	

Anlage A9: Versuchsablauf Treppe 2

*) Standzeit der Last

Diagramme zur Darstellung der Versuchsergebnisse

Anlagen A11-A12: Durchbiegungen in den Gebrauchslastzyklen

Anlagen A13-A16: Durchbiegungen in den Bruchlastzyklen

Anlagen A17-A20: Betonstauchungen in den Bruchlastzyklen

Anlagen A21-A22: Stahldehnungen in den Gebrauchslastzyklen

Anlagen A23-A27: Stahldehnungen in den Bruchlastzyklen

Anlagen A28-A31: vertikale Auflagerkräfte in den Gebrauchslastzyklen

Anlagen A32-A34: vertikale Auflagerkräfte in den Bruchlastzyklen

Anlagen A34-A37: horizontale Auflagerkräfte in den Gebrauchslastzyklen

Anlagen A38-A39: horizontale Auflagerkräfte in den Bruchlastzyklen

Rißbilder an den Versuchskörpern

Anlagen A40-A43: Darstellung der Rißentwicklung

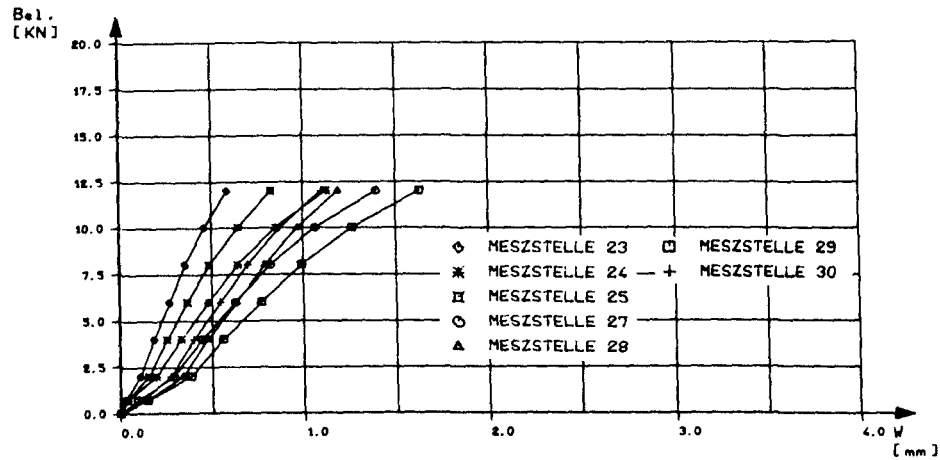
Anlagen A44-A46: Ergebnisse der Rißbreitenmessungen

Anlagen A47-A71: Tabellarische Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Anlage A10: Übersicht zur Darstellung der Versuchsergebnisse

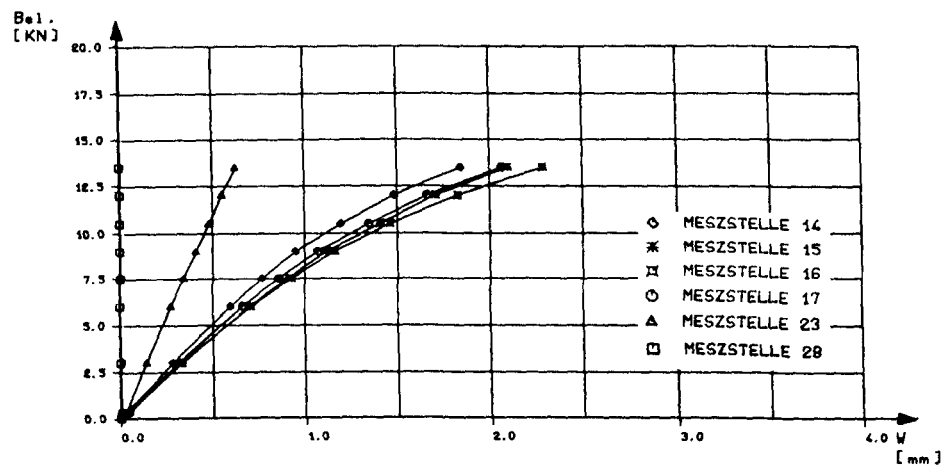
Versuchskörper Treppe 1

Durchbiegungen in den Gebrauchslastzyklen

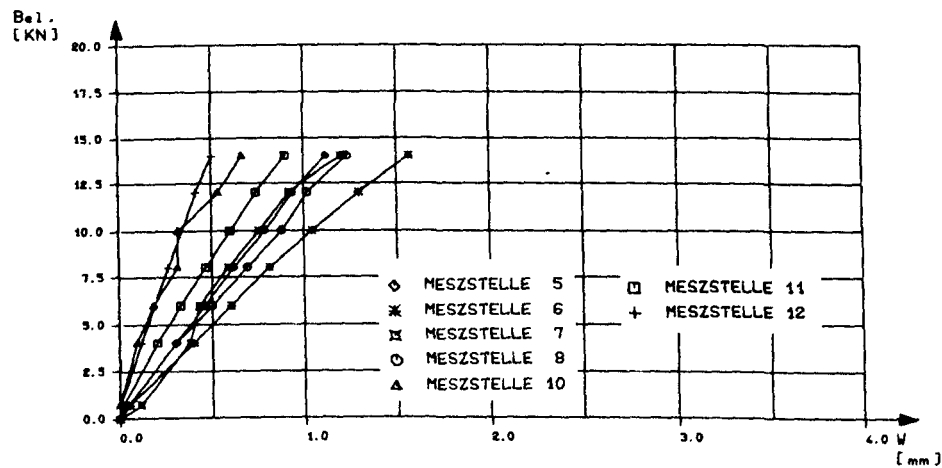


Belastung auf:

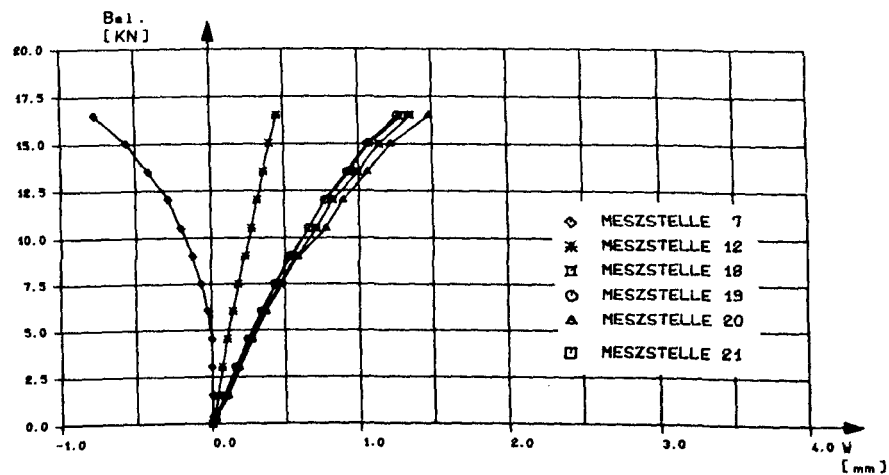
oberem Podest



oberem Lauf



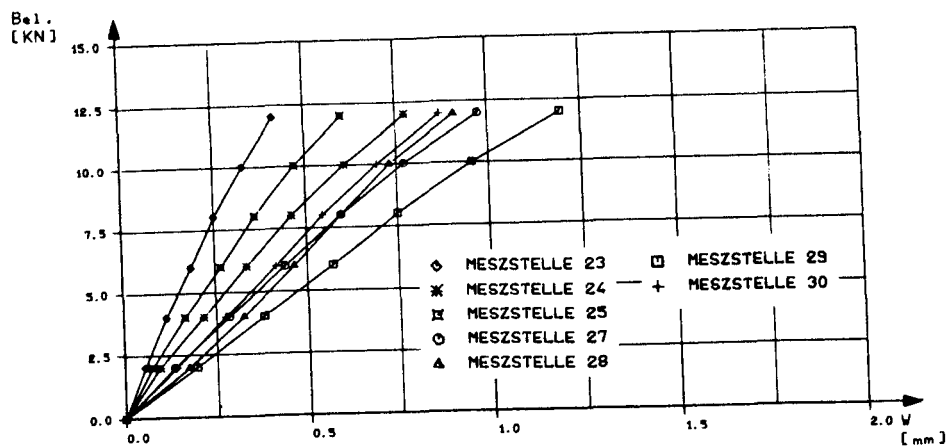
unterem Podest



unterem Lauf

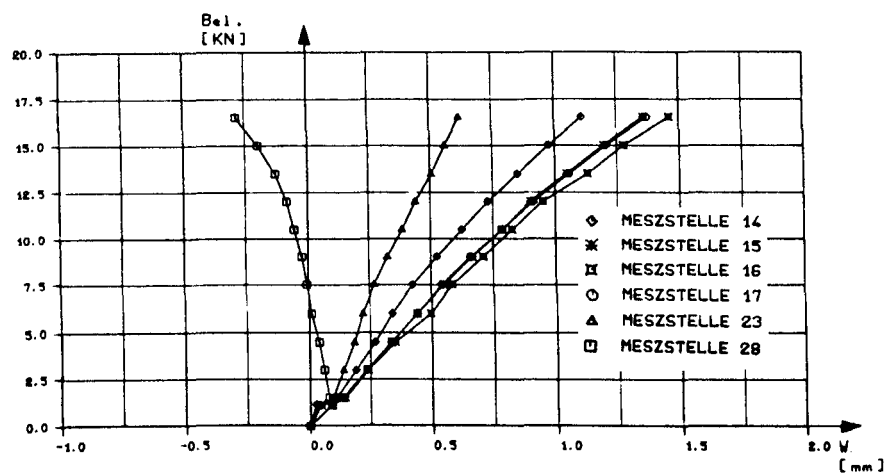
Versuchskörper Treppe 2

Durchbiegungen in den Gebrauchslastzyklen

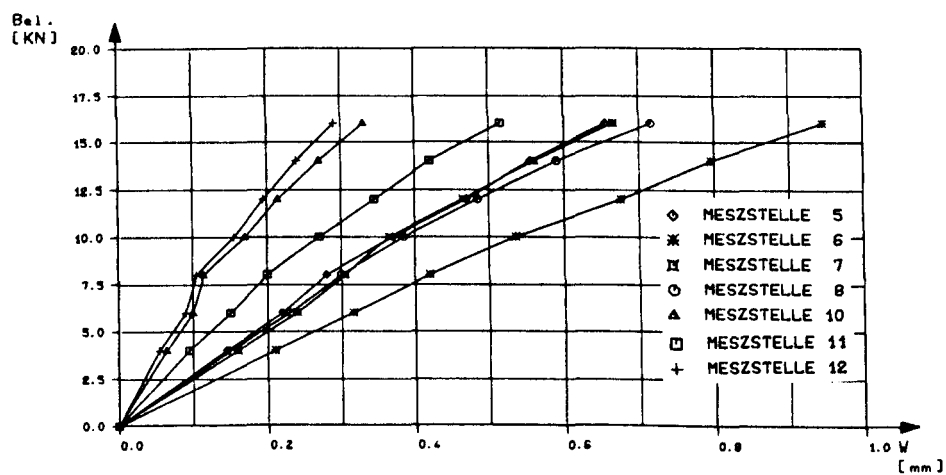


Belastung auf:

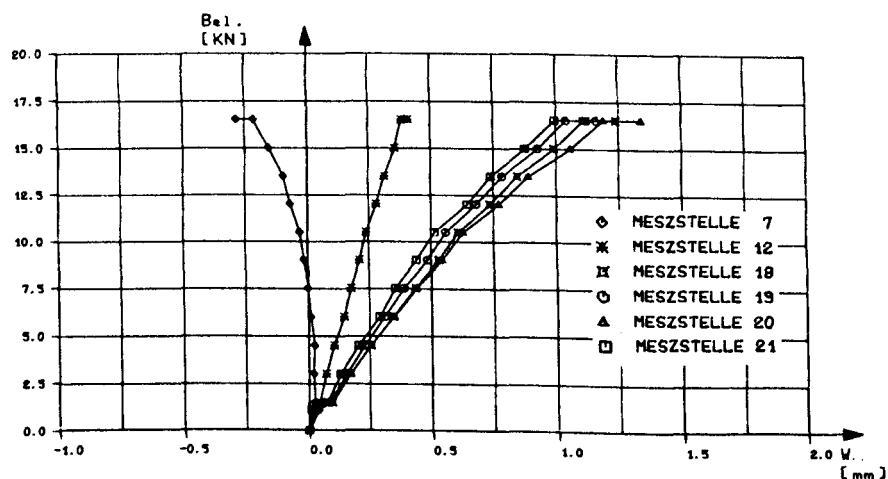
oberem Podest



oberem Lauf

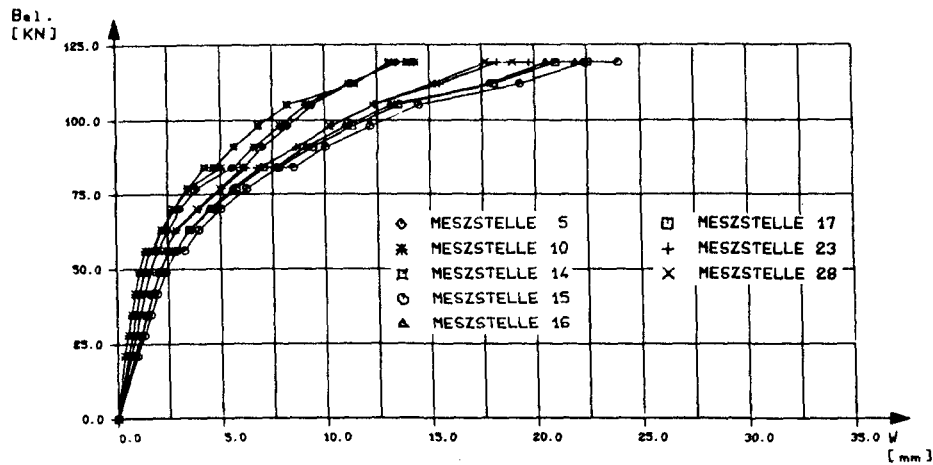


unterem Podest

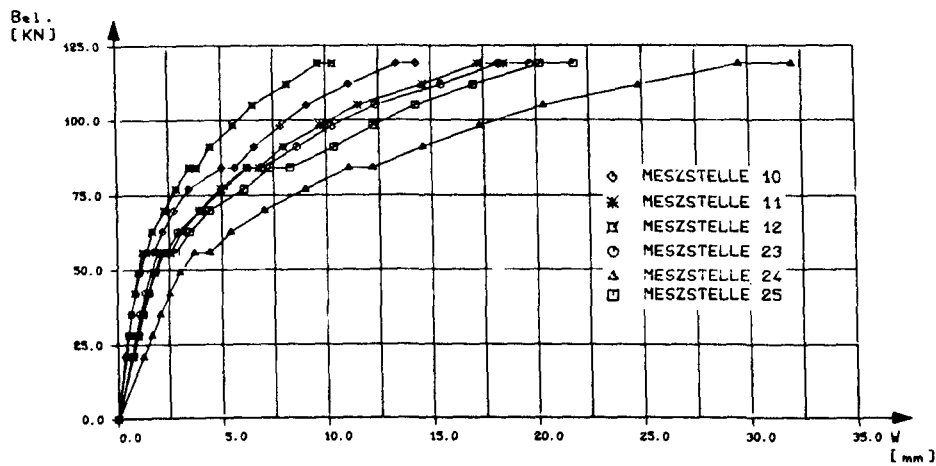


unterem Lauf

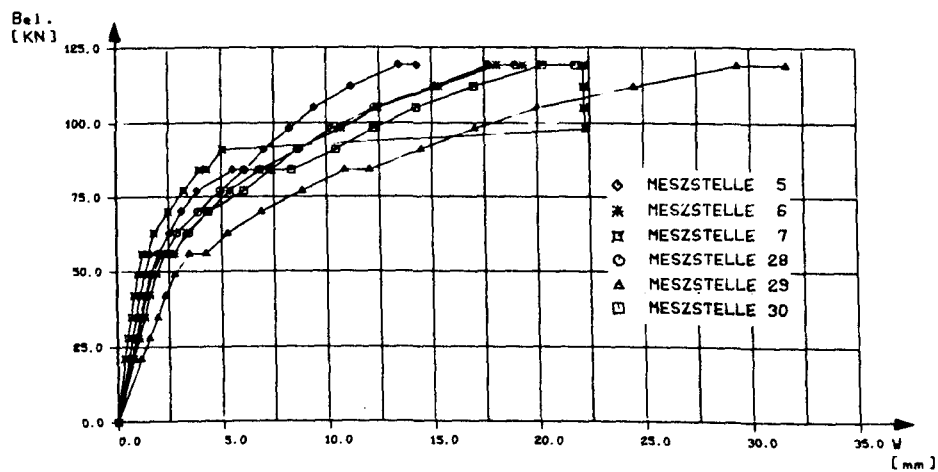
Versuchskörper Treppe 1



a)



b)

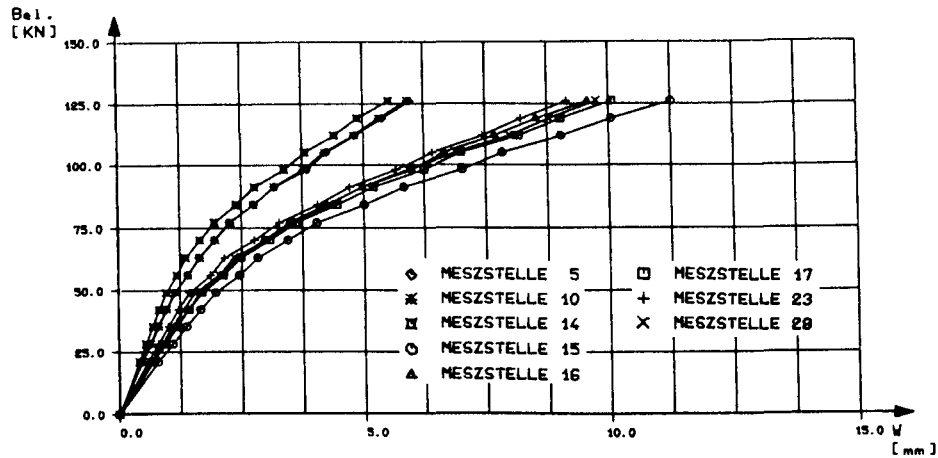


c)

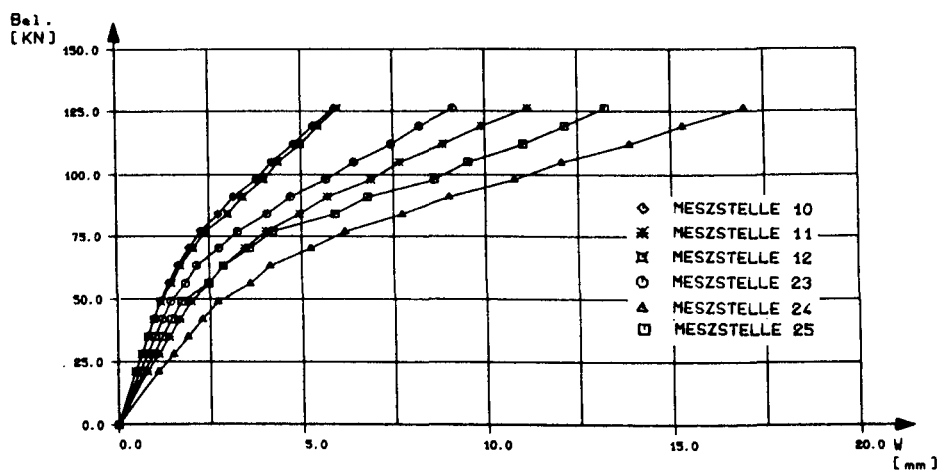
Durchbiegungen im Bruchlastzyklus 1 bei Belastung aller Bauteile an den Meßstellen

- a) im Längsschnitt
- b) entlang der Knicklinien
- c) entlang der freien Podostränder

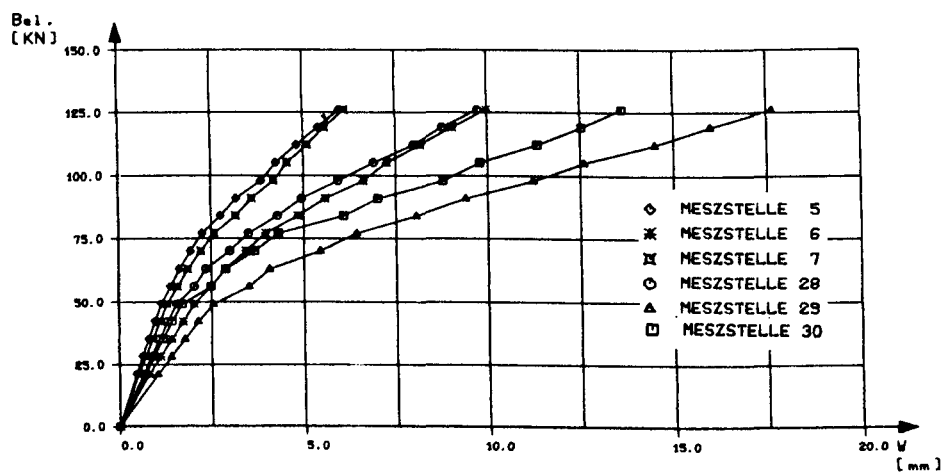
Versuchskörper Treppe 2



a)



b)



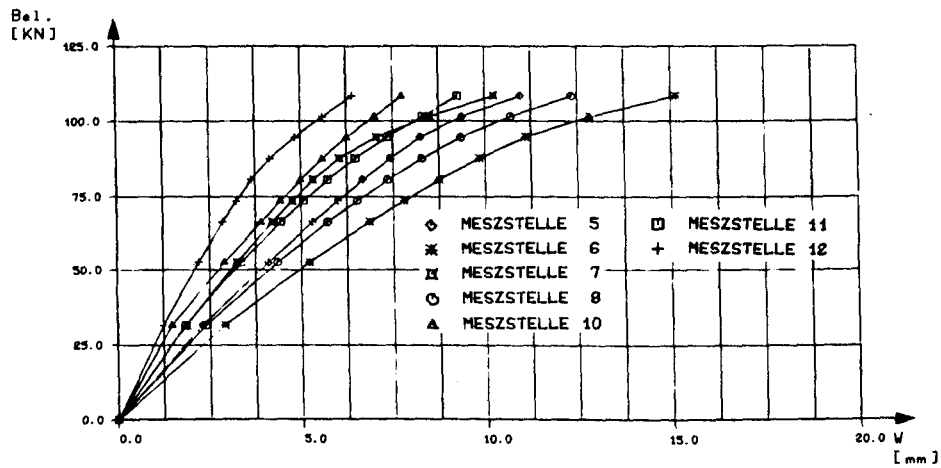
c)

Durchbiegungen im Bruchlastzyklus 1 bei Belastung aller Bauteile an den Meßstellen

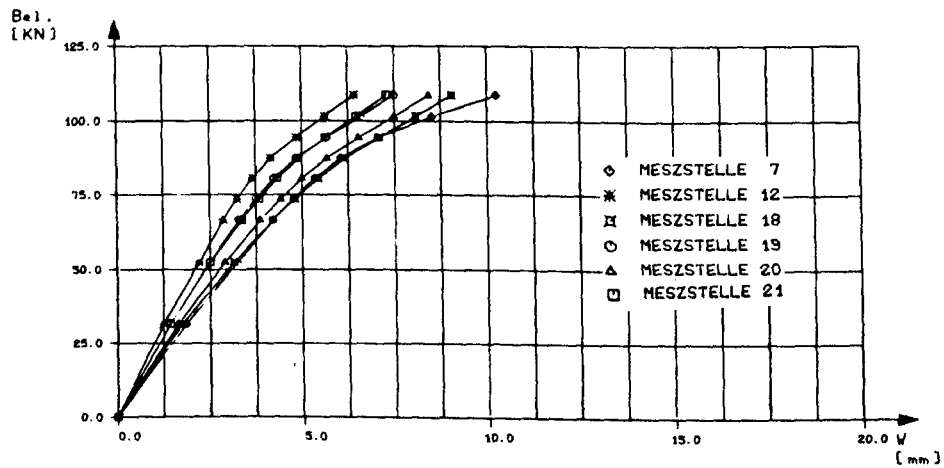
- a) im Längsschnitt
- b) entlang der Knicklinien
- c) entlang der freien Podestränder

Versuchskörper Treppe 1

Durchbiegungen bei Belastung auf unterem Lauf und Podest im Bruchlastzyklus 2



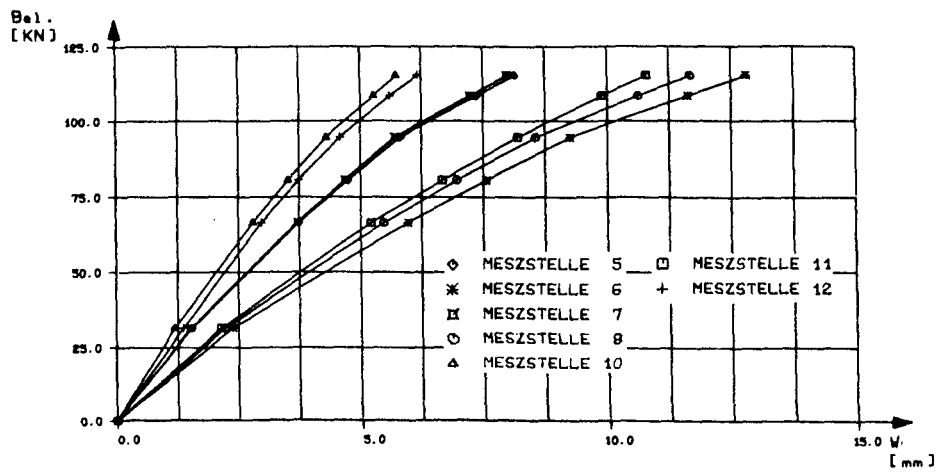
Meßstellen
unteres Podest



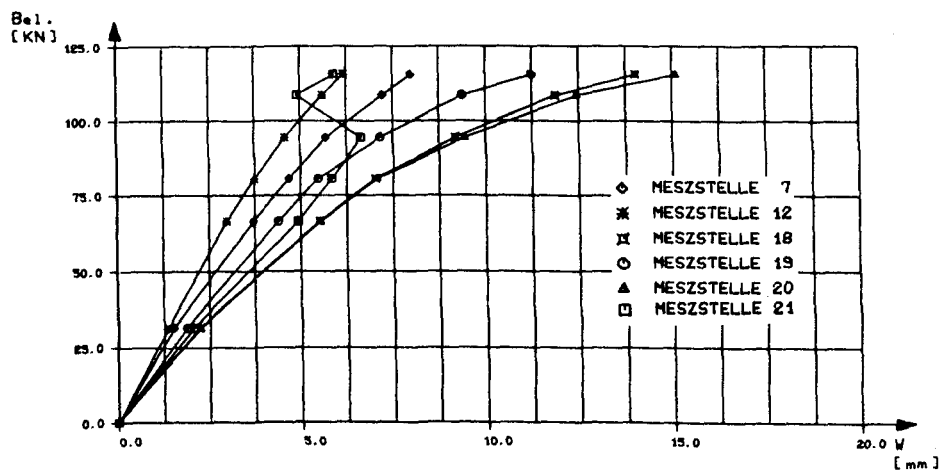
Meßstellen
unteres Podest
unterer Lauf

Versuchskörper Treppe 2

Durchbiegungen bei Belastung auf unterem Lauf und Podest im Bruchlastzyklus 2



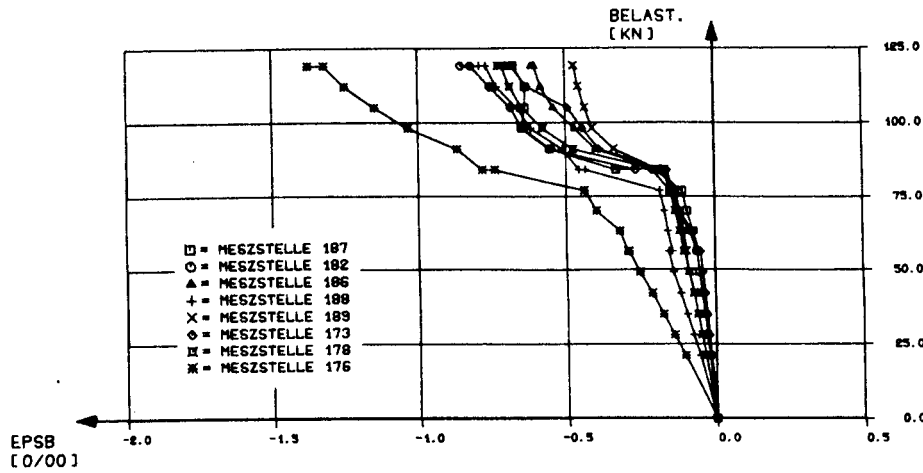
Meßstellen
unteres Podest



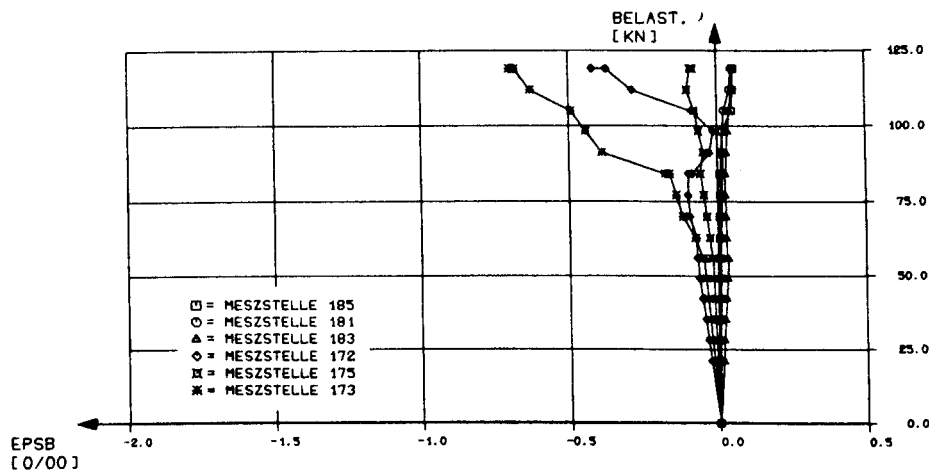
Meßstellen
unteres Podest
unterer Lauf

Versuchskörper Treppe 1

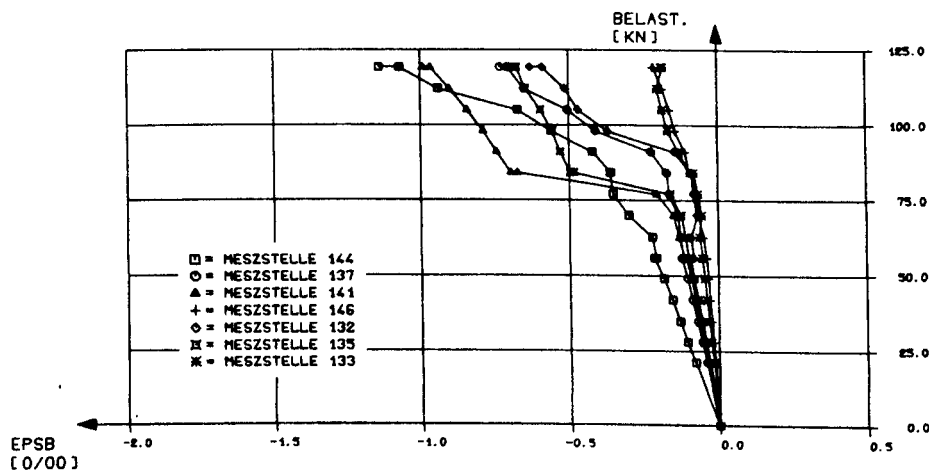
Betonstauchungen bei Belastung des Gesamtsystems im Bruchlastzyklus 1



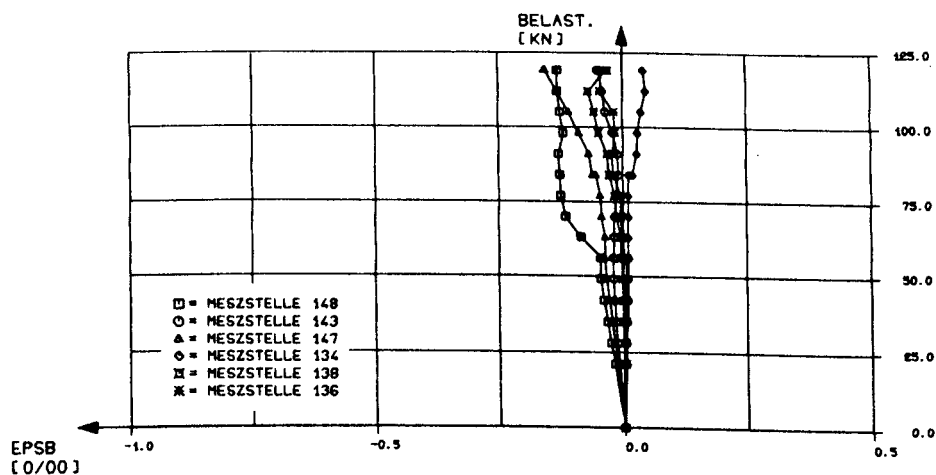
oberes Podest
x-Richtung



oberes Podest
y-Richtung

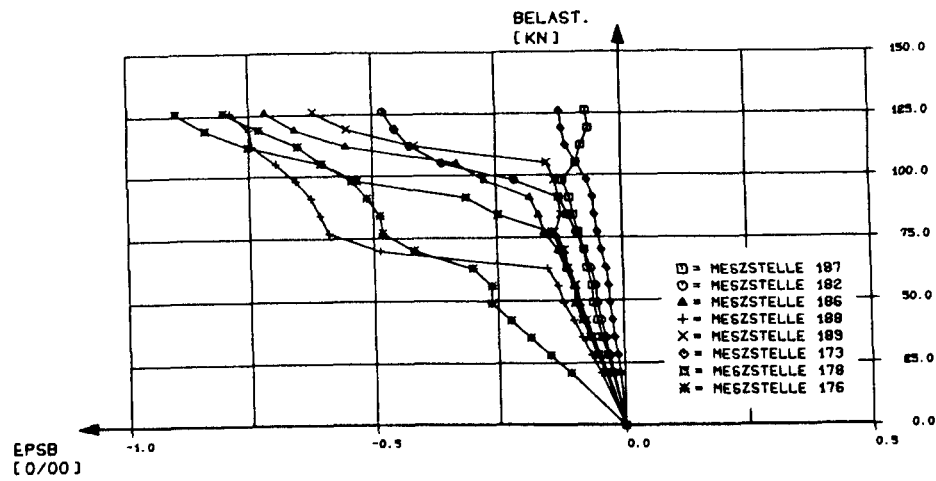


unteres Podest
x-Richtung

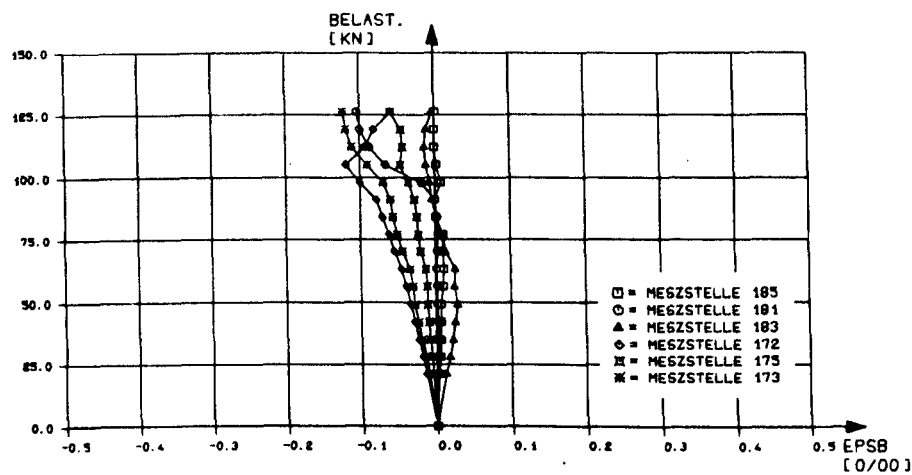


unteres Podest
y-Richtung

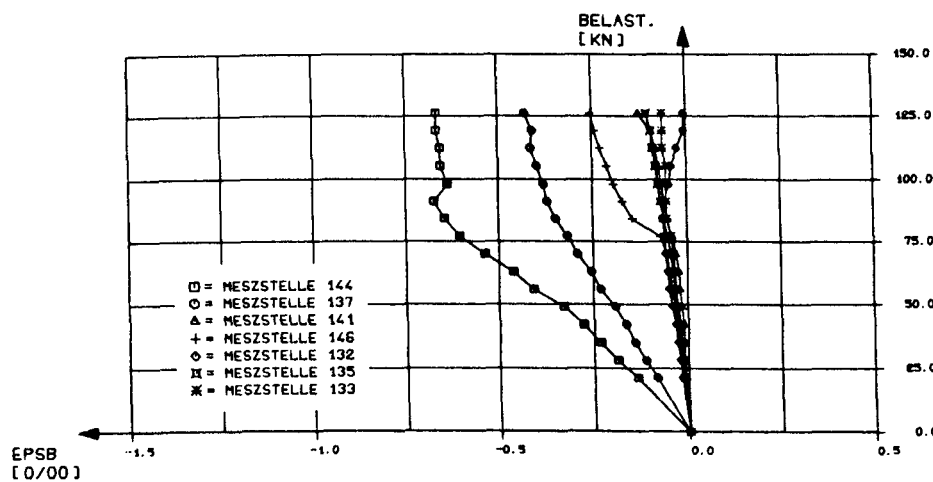
Versuchskörper Treppe 2
Betonstauchungen bei Belastung des Gesamtsystems im Bruchlastzyklus 1



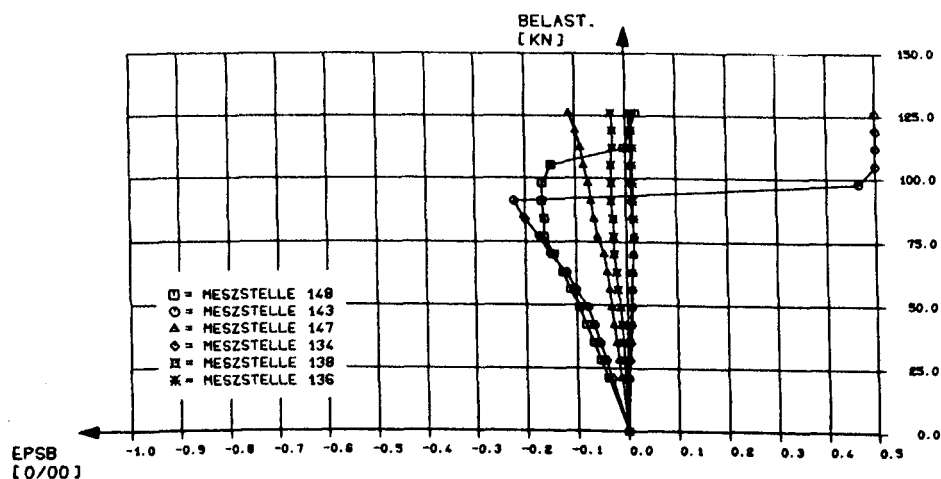
oberes Podest
x-Richtung



oberes Podest
y-Richtung



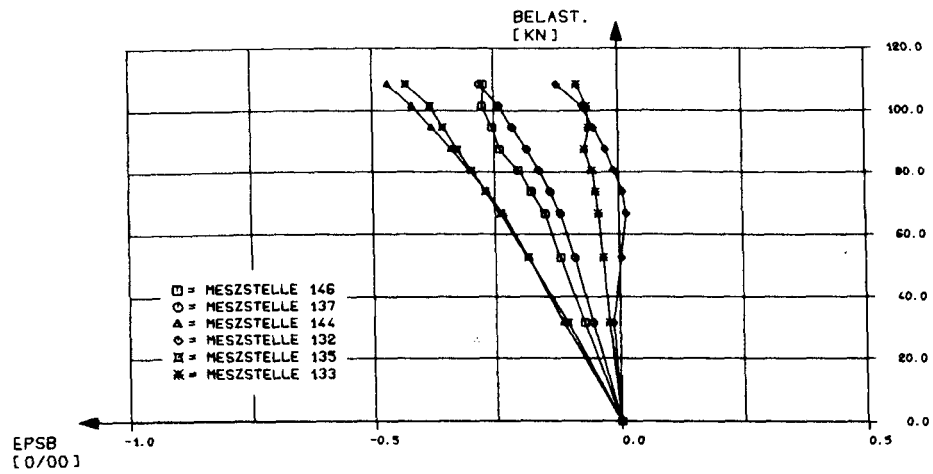
unteres Podest
x-Richtung



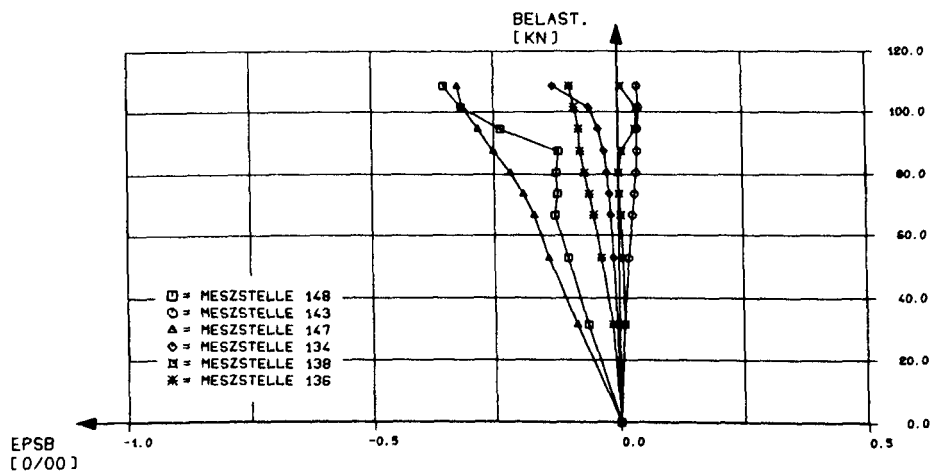
unteres Podest
y-Richtung

Versuchskörper Treppe 1

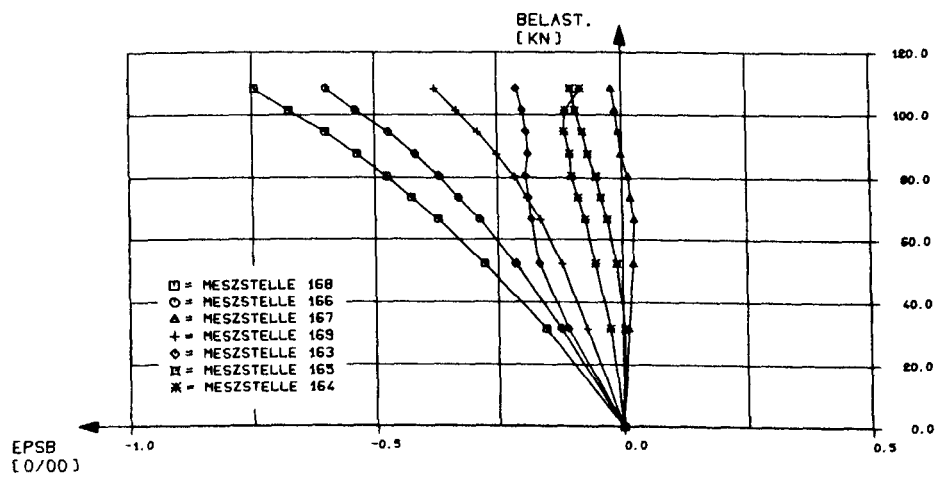
Betonstauchungen im Bruchlastzyklus 2



unteres Podest
x-Richtung



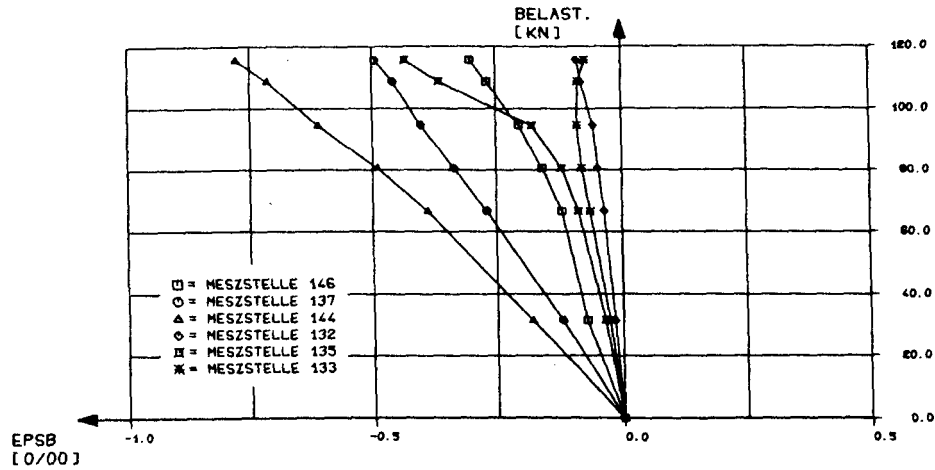
unteres Podest
y-Richtung



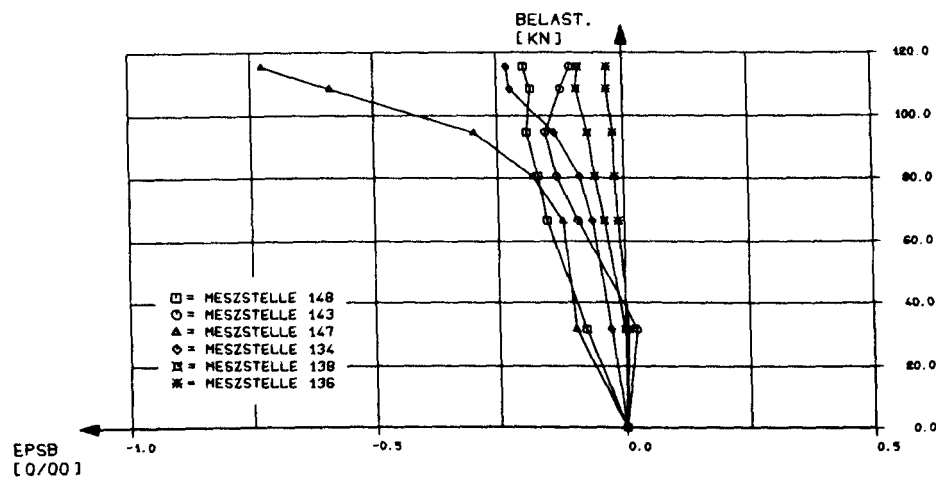
unterer Lauf

Versuchskörper Treppe 2

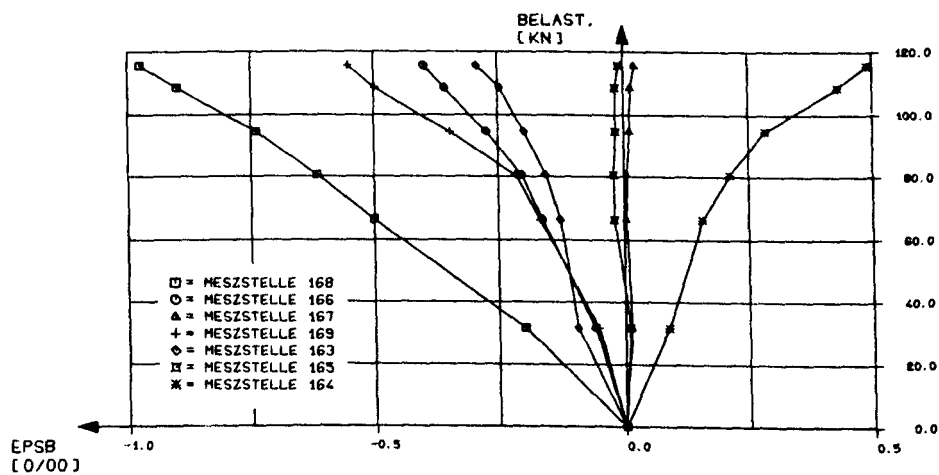
Betonstauchungen im Bruchlastzyklus 2



unteres Podest
x-Richtung



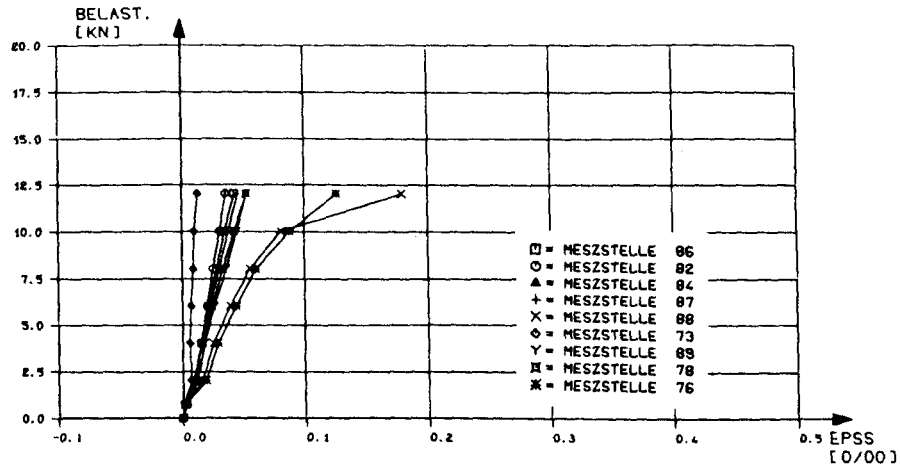
unteres Podest
y-Richtung



unterer Lauf

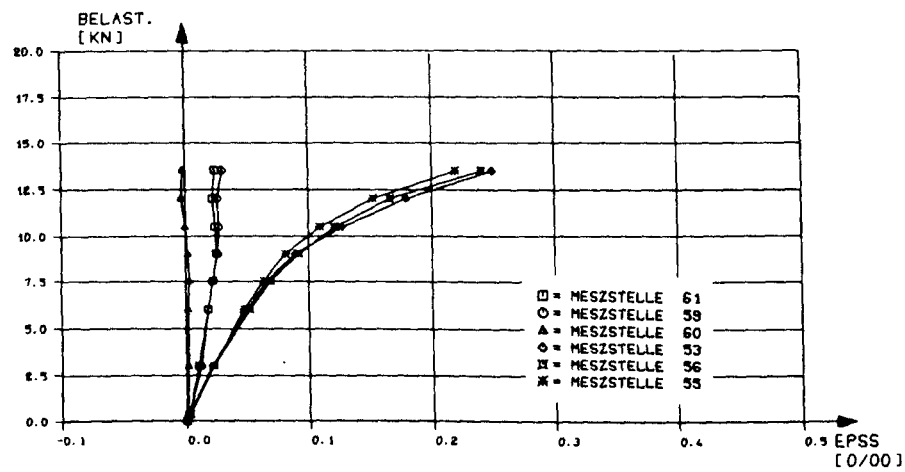
Versuchskörper Treppe 1

Stahldehnungen in den Gebrauchslastzyklen

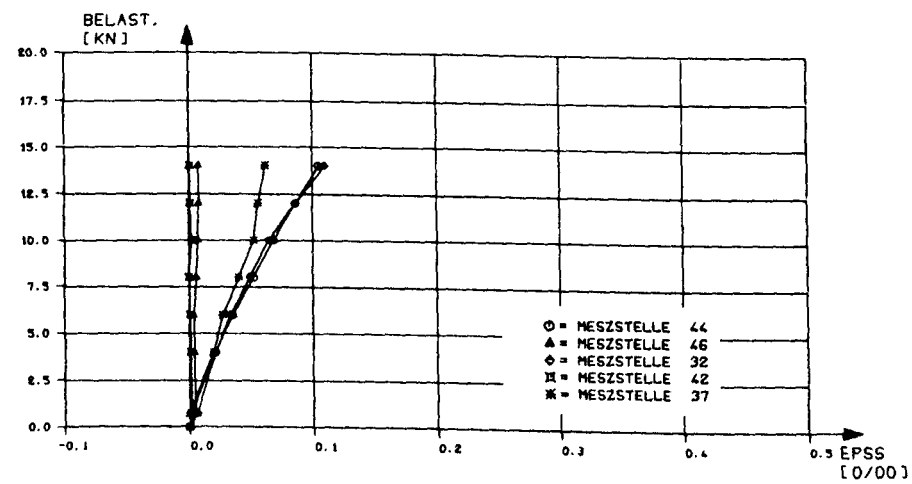


Belastung auf:

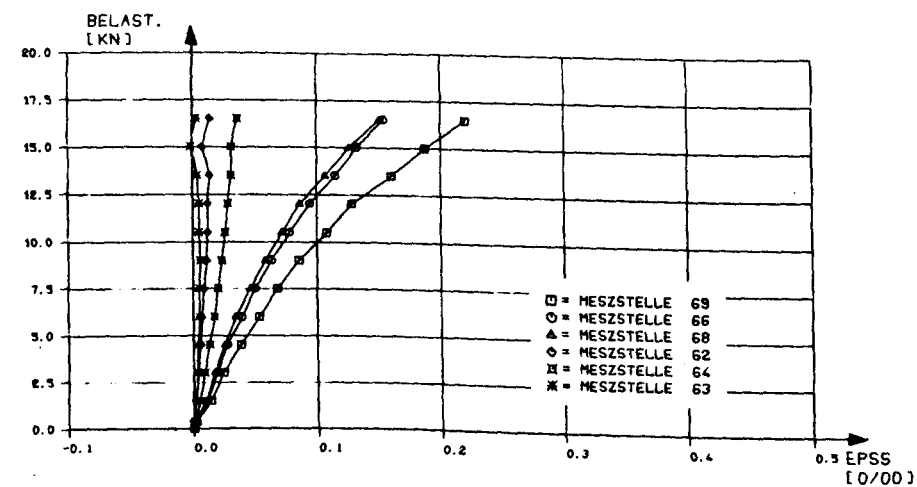
oberem Podest



oberem Lauf



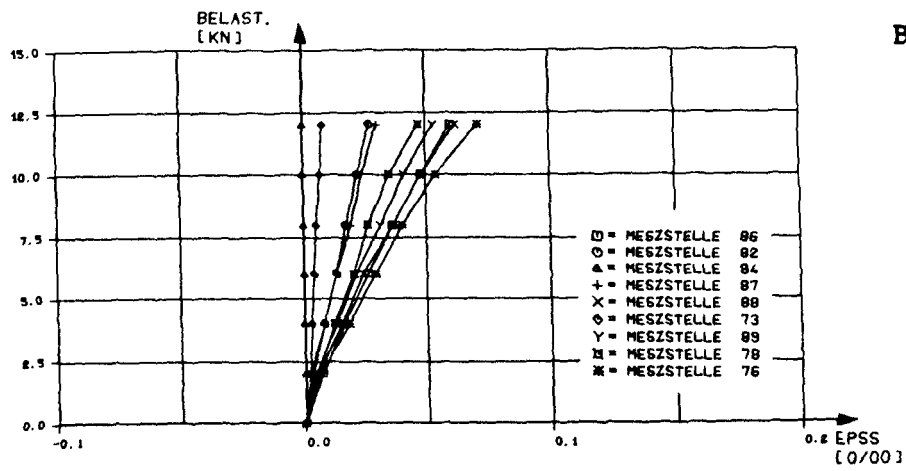
unterem Podest



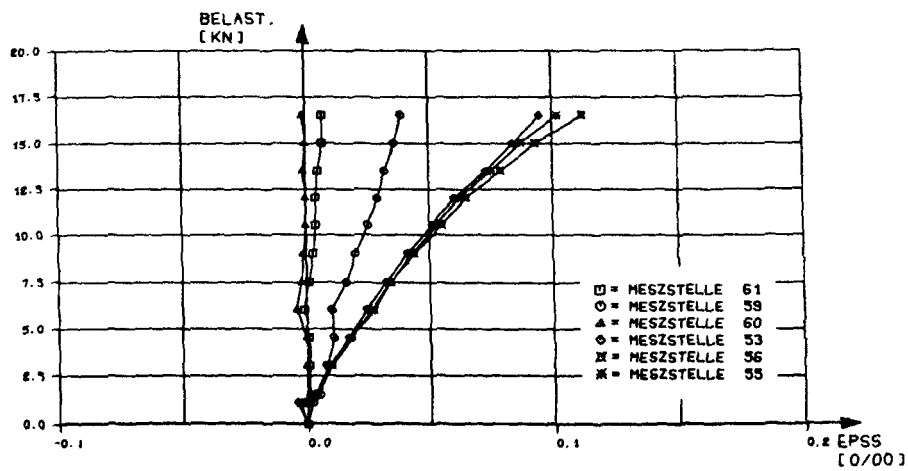
unterem Lauf

Versuchskörper Treppe 2

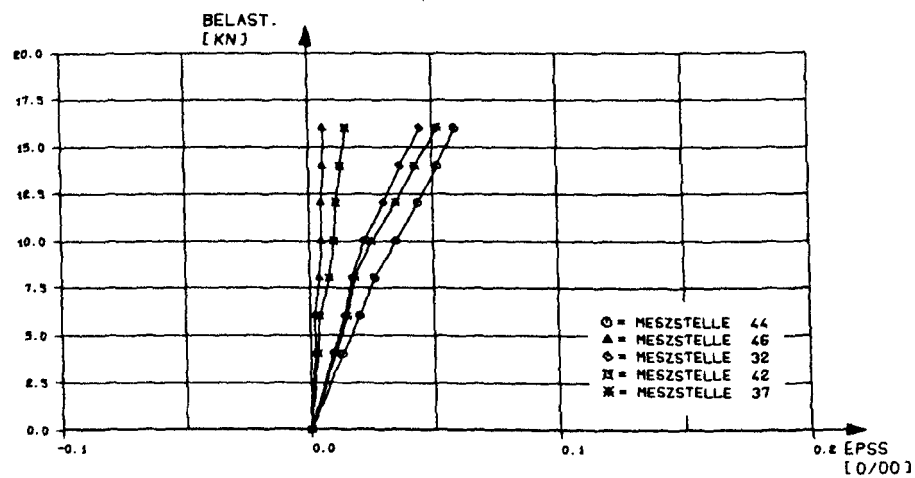
Stahldehnungen in den Gebrauchslastzyklen



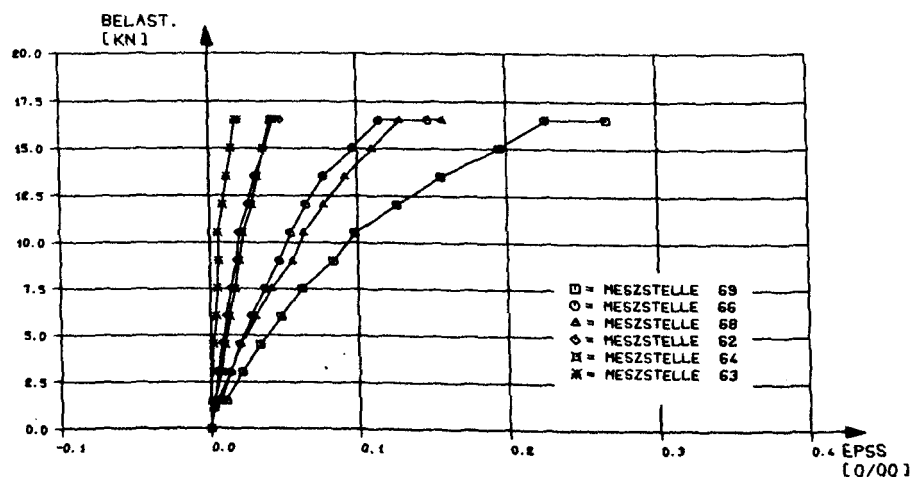
oberem Podest



oberem Lauf

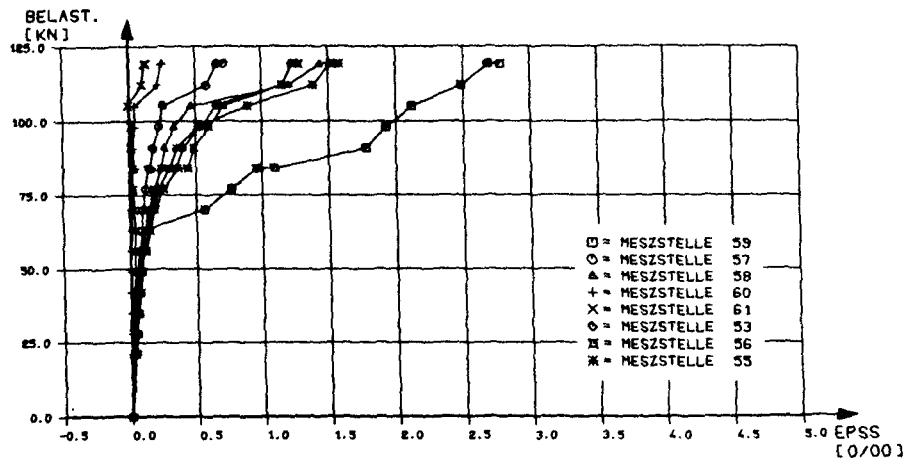


unterem Podest

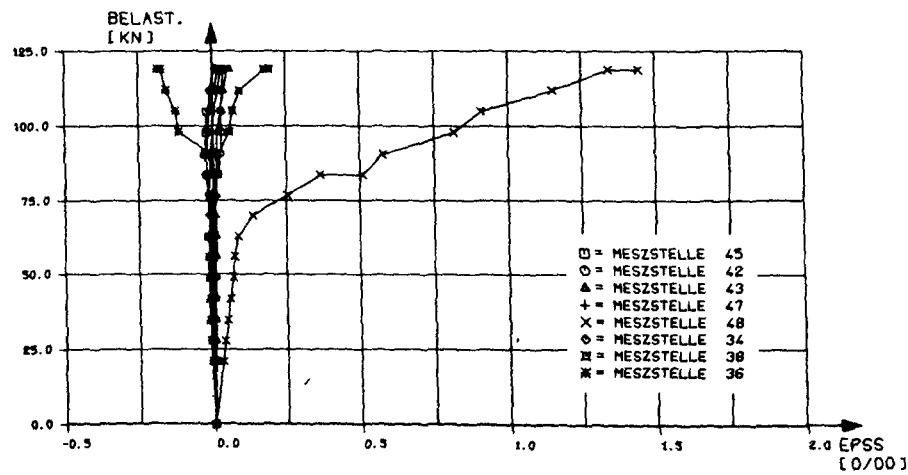


unterem Lauf

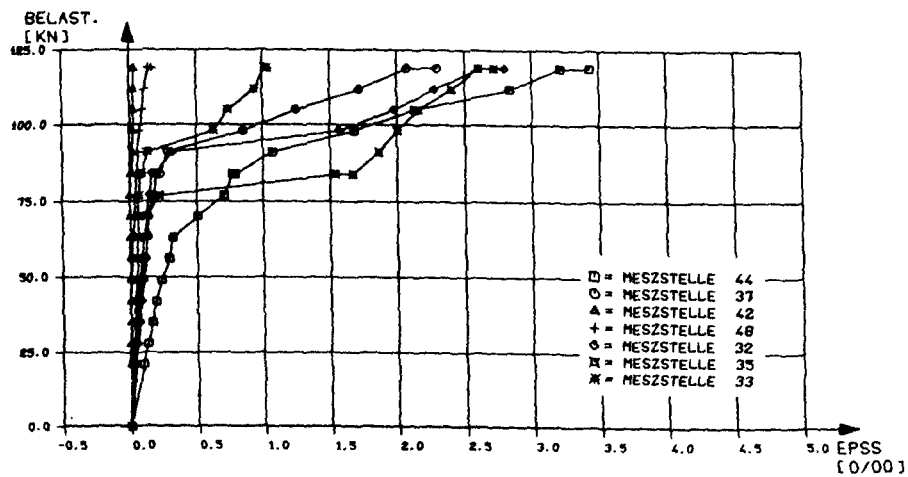
Versuchskörper Treppe 1
Stahldehnungen im Bruchlastzyklus 1



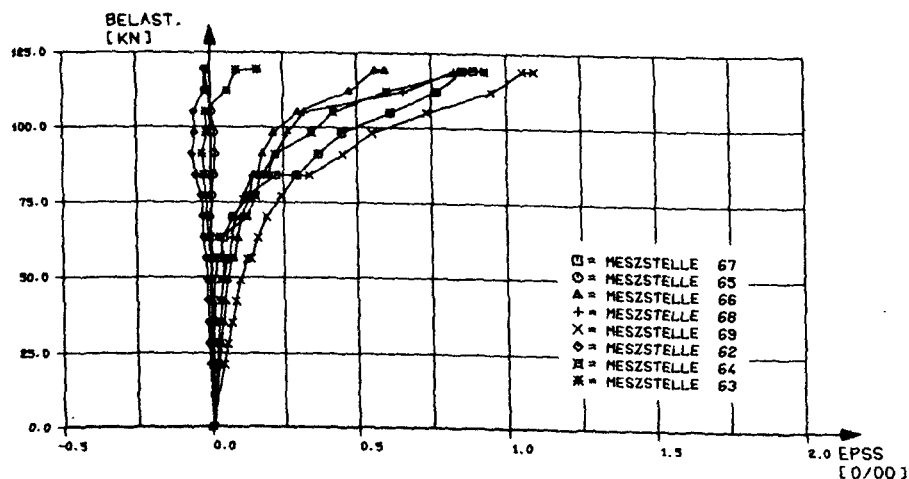
oberer Lauf



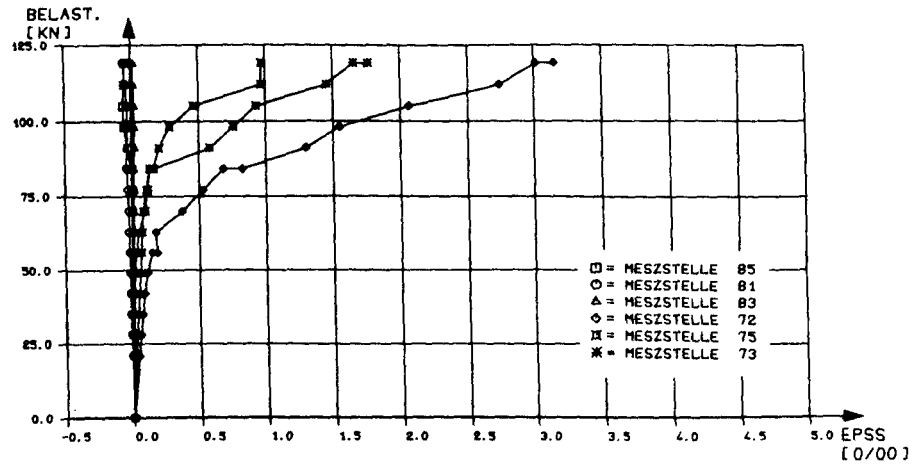
unteres Podest
y-Richtung



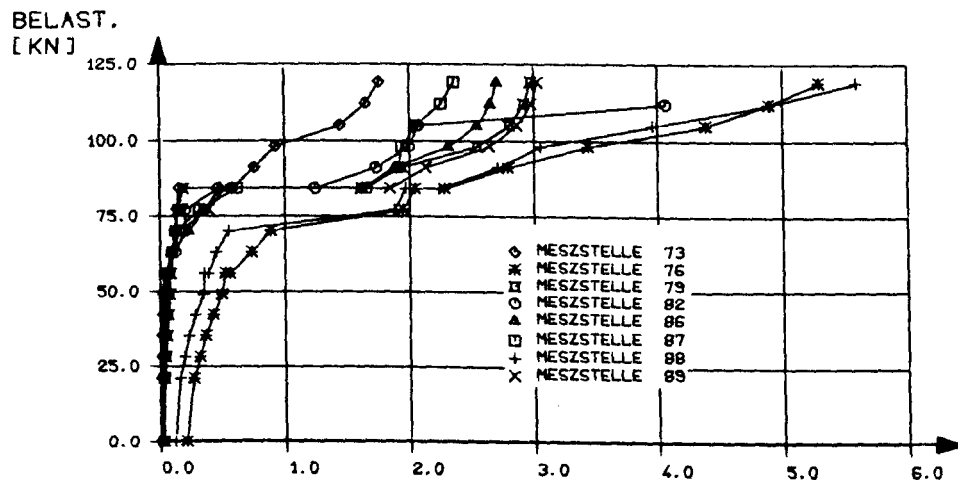
unteres Podest
x-Richtung



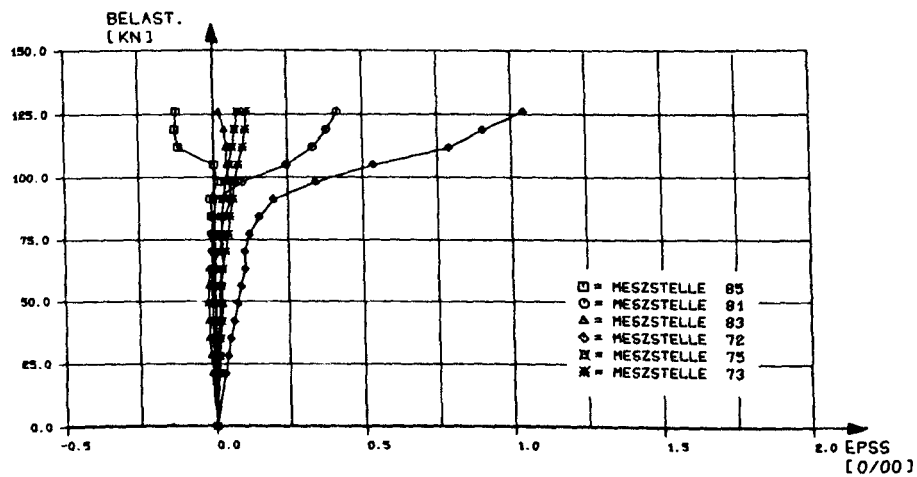
unterer Lauf



Treppe 1



Treppe 1

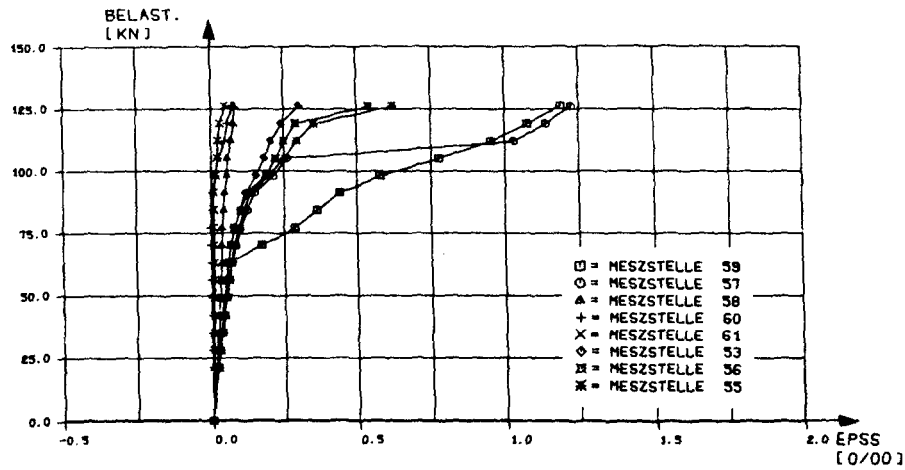


Treppe 2

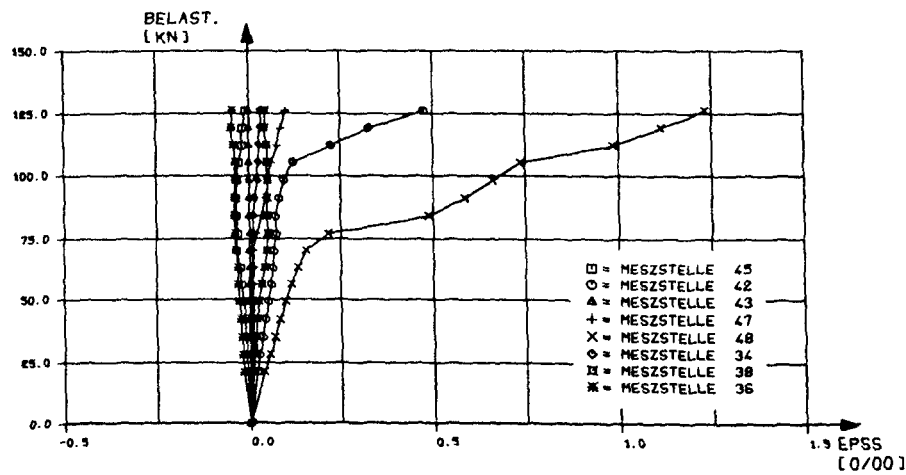
Stahldehnungen im Bruchlastzyklus 1 für das obere Podest

Versuchskörper Treppe 2

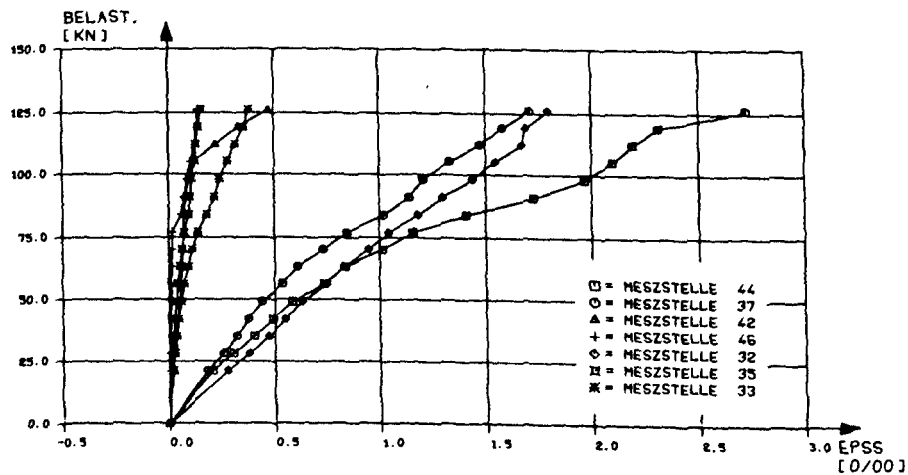
Stahldehnungen bei Belastung des Gesamtsystems im Bruchlastzyklus 1



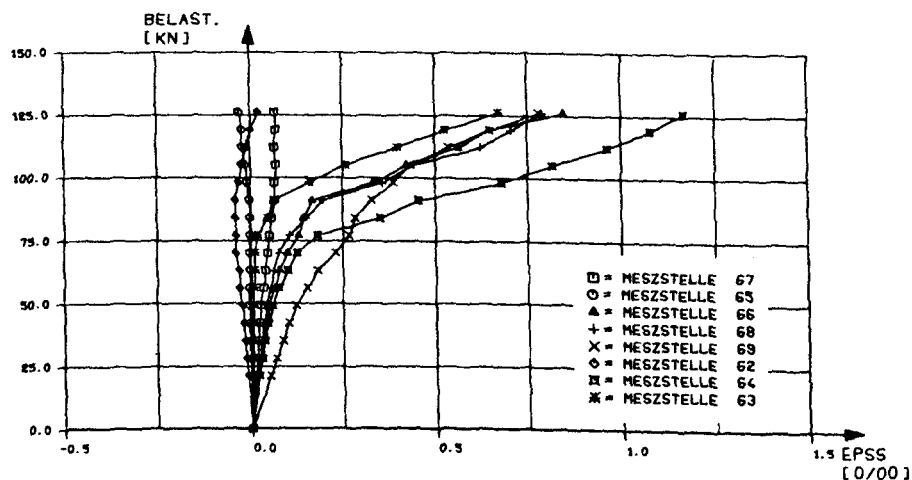
oberer Lauf



unteres Podest
y-Richtung

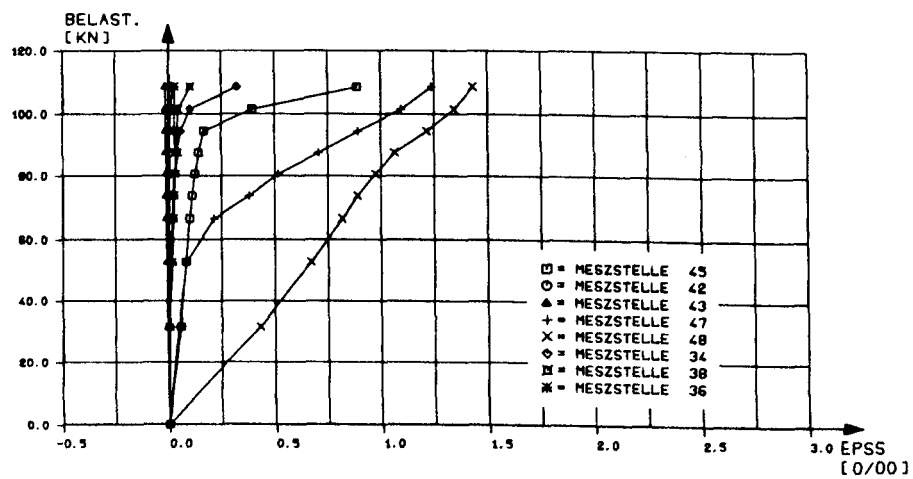
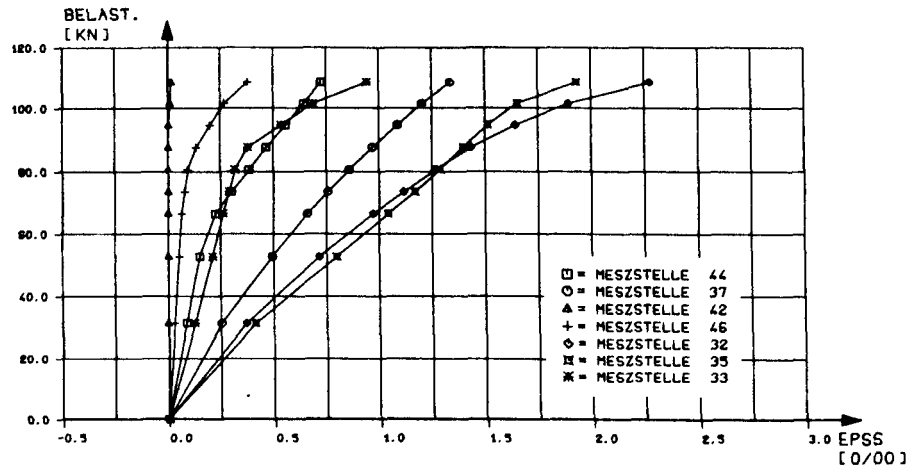


unteres Podest
x-Richtung



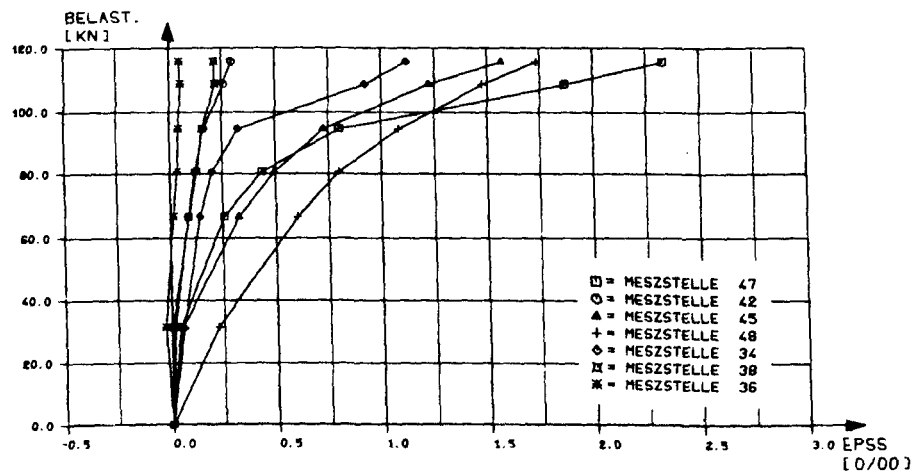
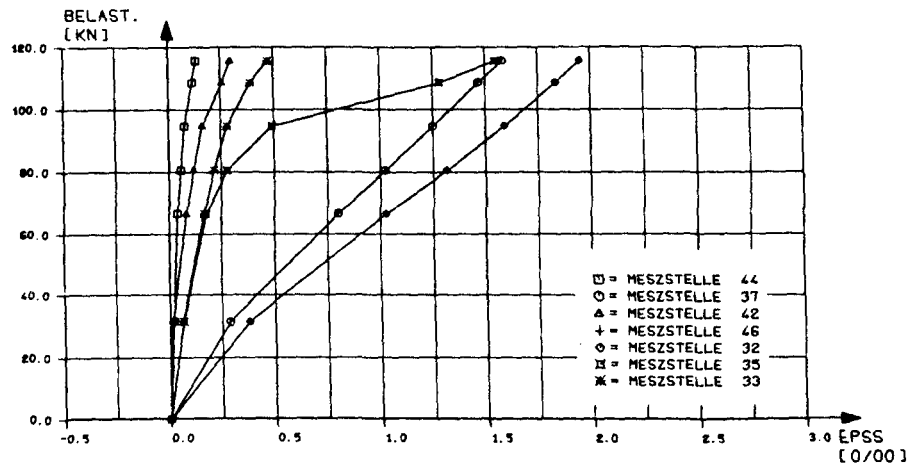
unterer Lauf

Versuchskörper Treppe 1



Stahldehnungen des unteren Podestes im Bruchlastzyklus 2

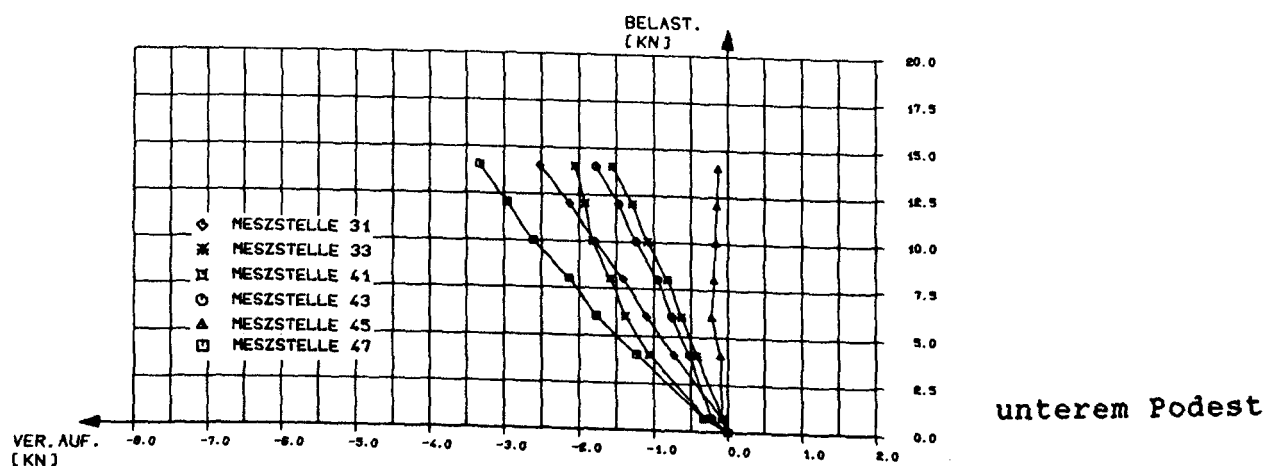
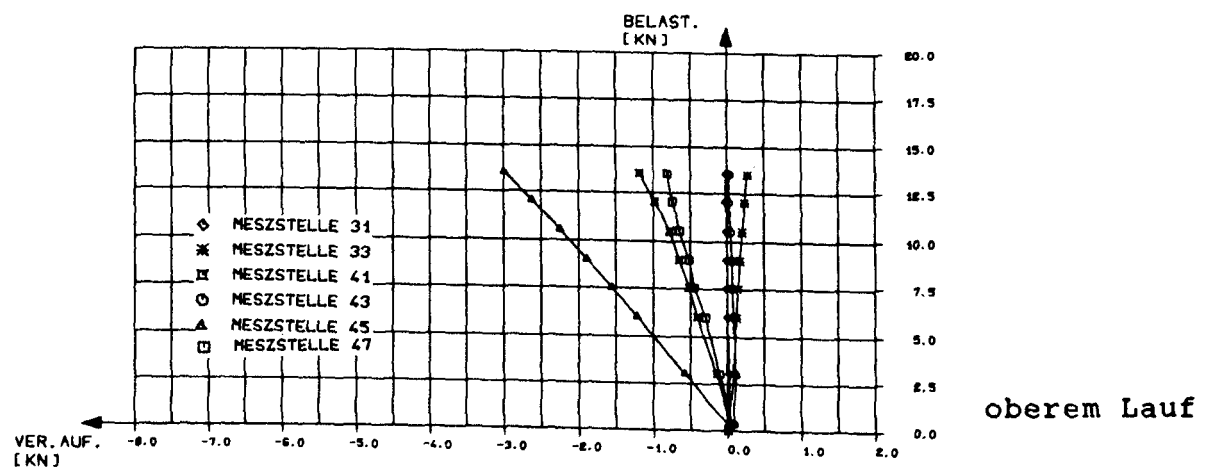
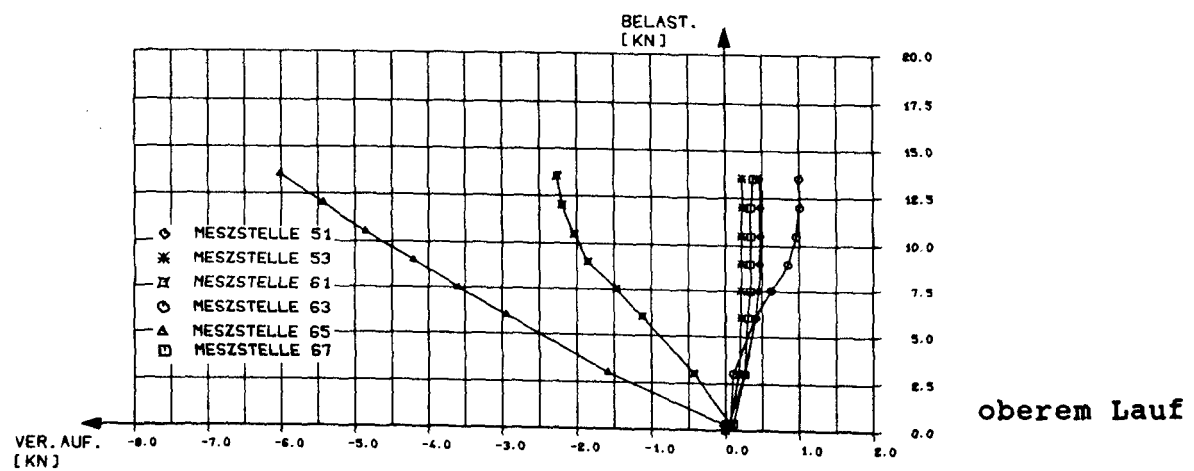
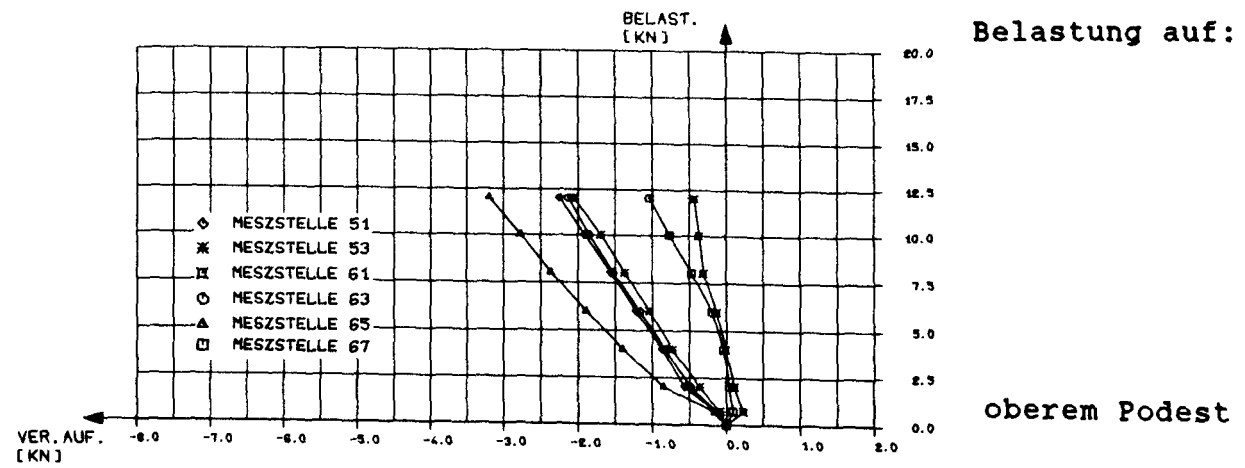
Versuchskörper Treppe 2



Stahldehnungen des unteren Podestes im Bruchlastzyklus 2

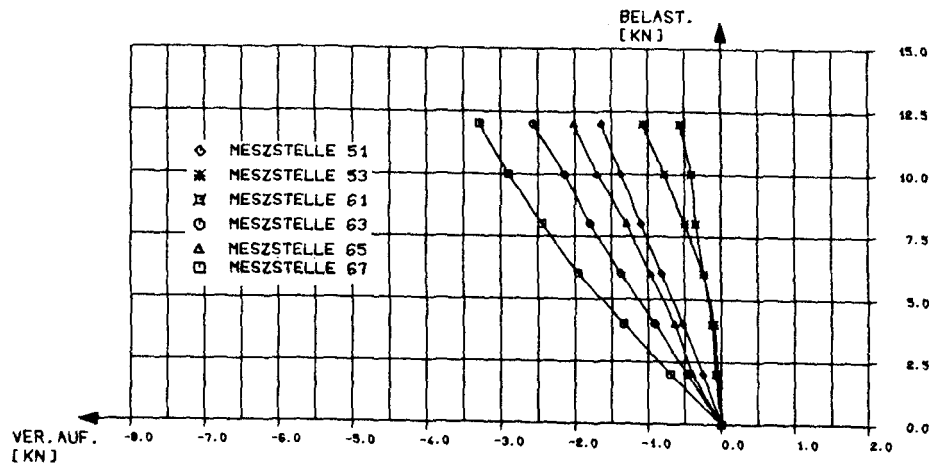
Versuchskörper Treppe 1

vertikale Auflagerkräfte in den Gebrauchslastzyklen



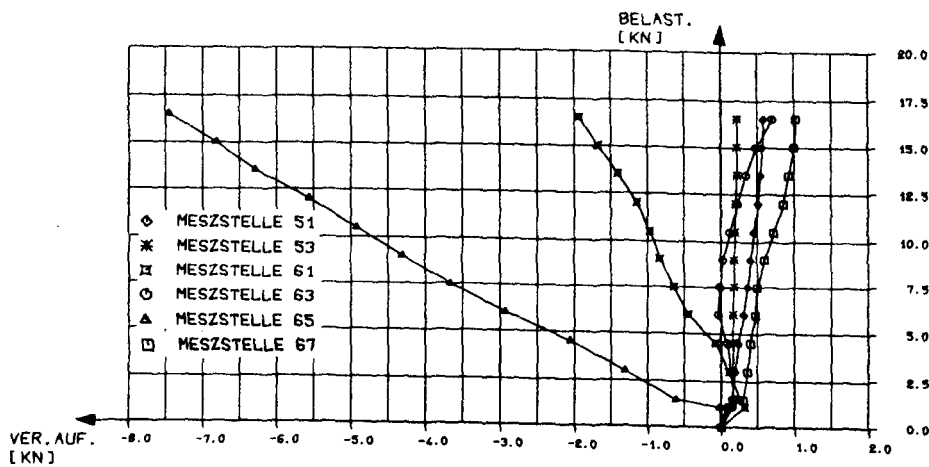
Versuchskörper Treppe 2

vertikale Auflagerkräfte in den Gebrauchslastzyklen

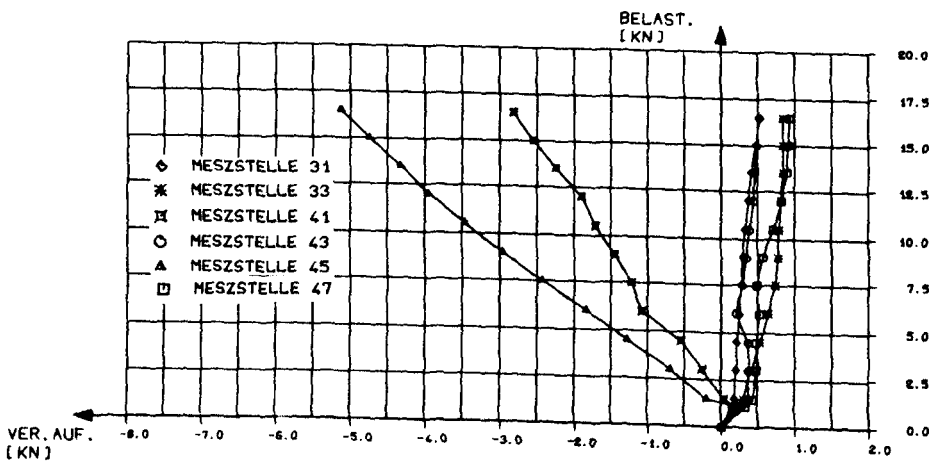


Belastung auf:

oberem Podest



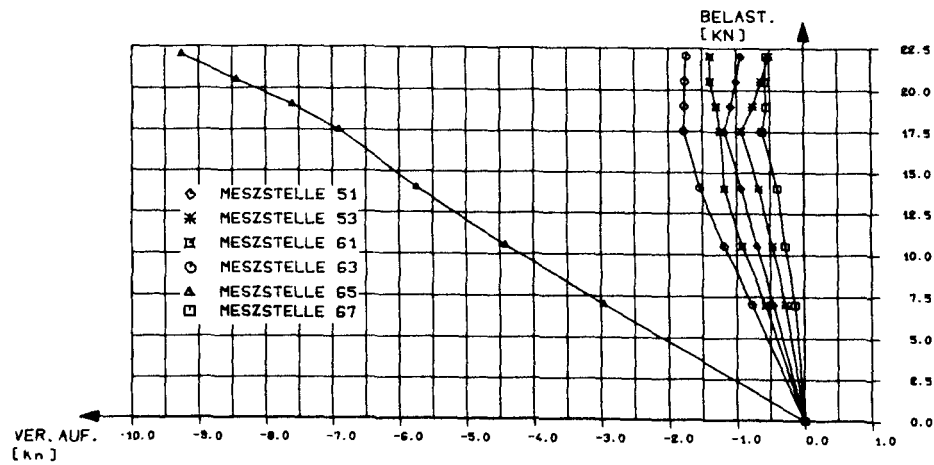
oberem Lauf



oberem Lauf

Versuchskörper Treppe 1

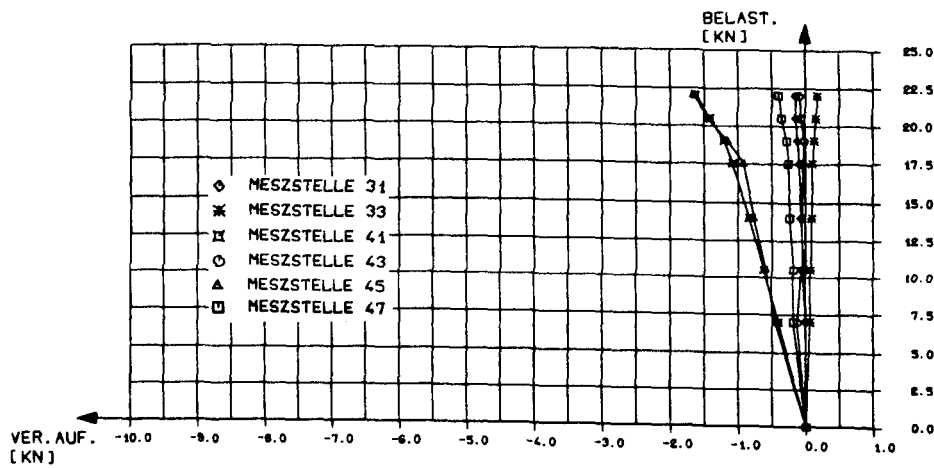
vertikale Auflagerkräfte in den Gebrauchslastzyklen



Belastung auf:

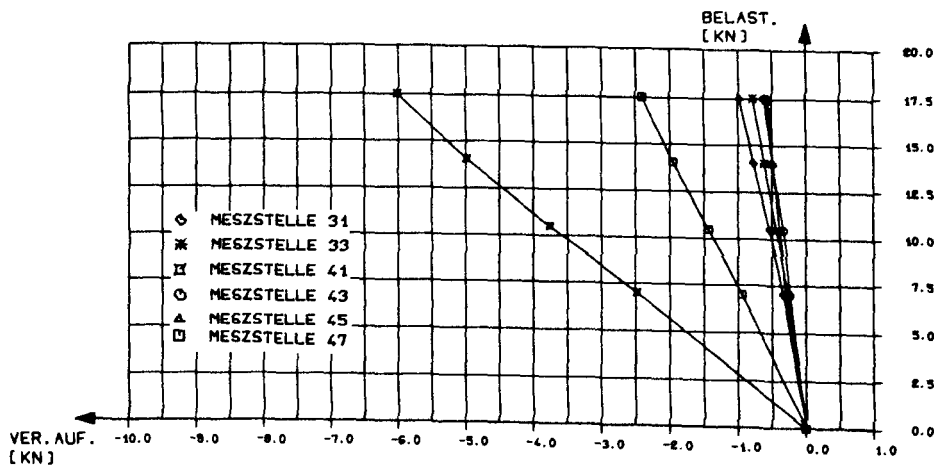
oberem Lauf

oberem Podest



oberem Lauf

oberem Podest

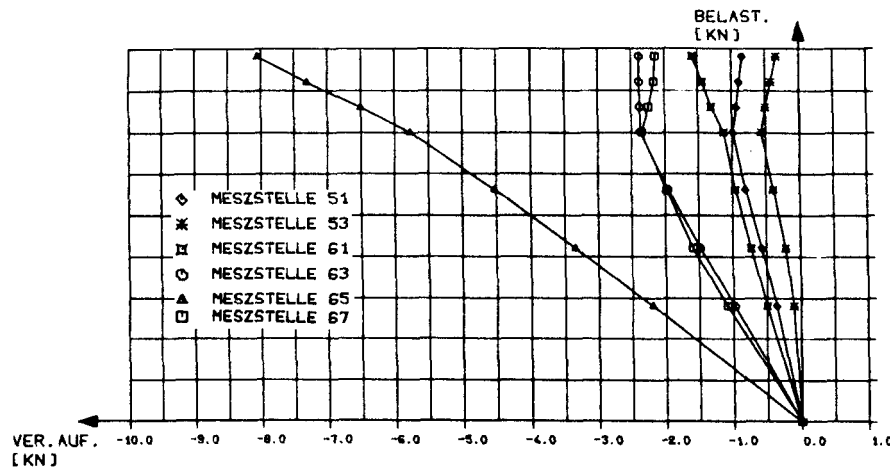


unterem Lauf

unterem Podest

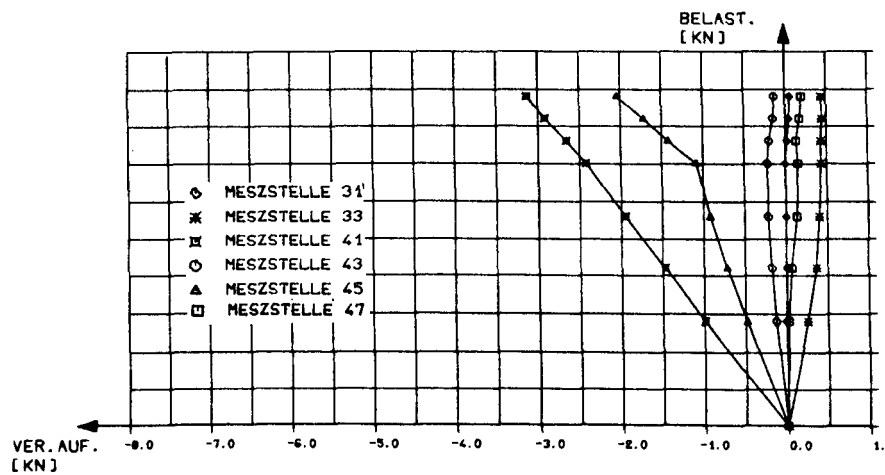
Versuchskörper Treppe 2

vertikale Auflagerkräfte in den Gebrauchslastzyklen

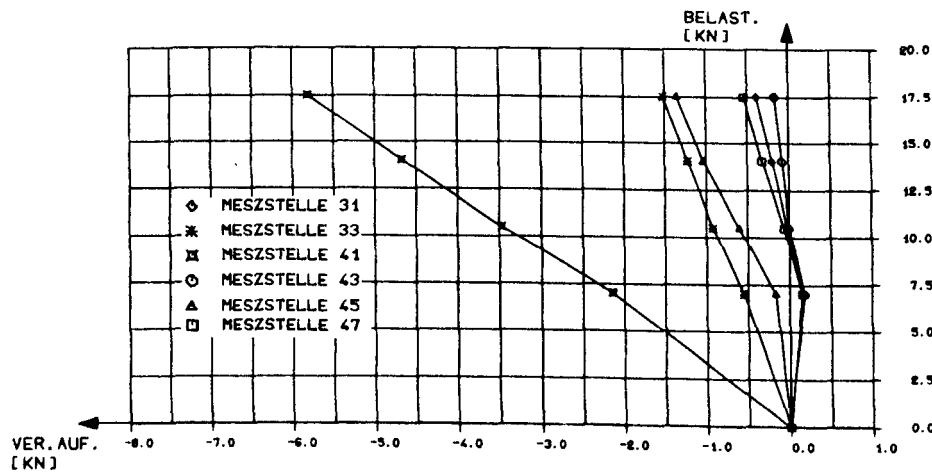


Belastung auf:

oberem Lauf
oberem Podest

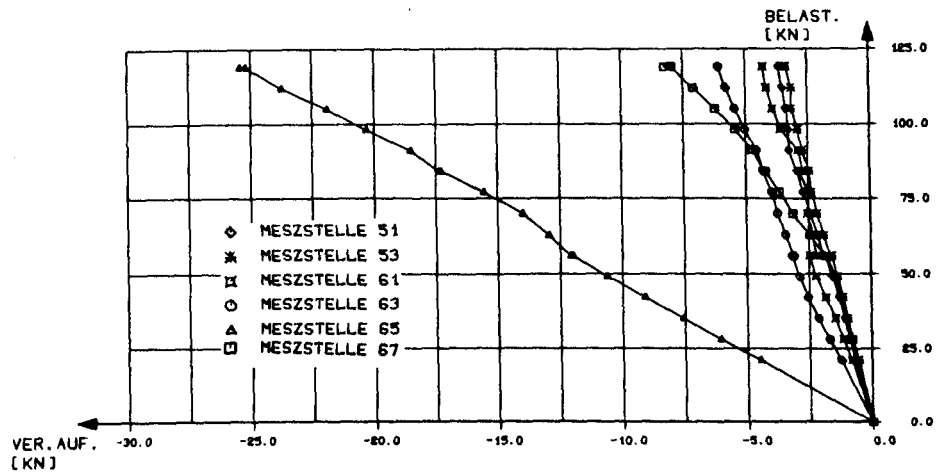


oberem Lauf
oberem Podest

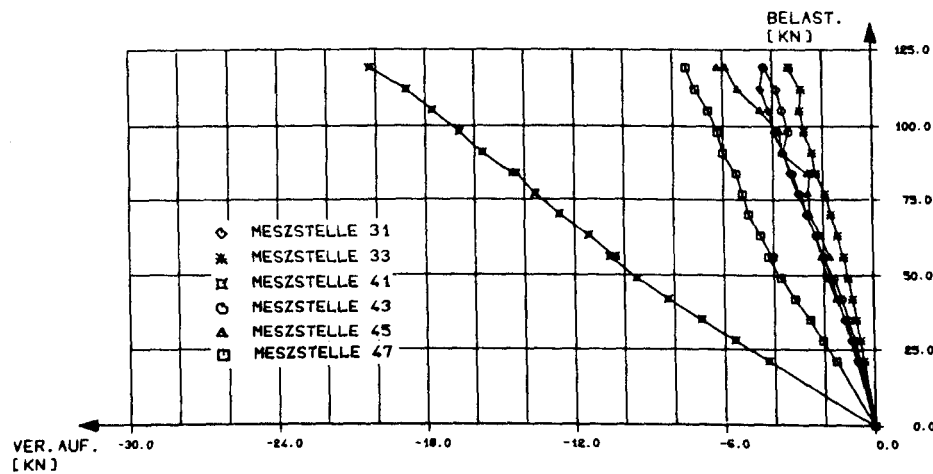


unterem Lauf
unterem Podest

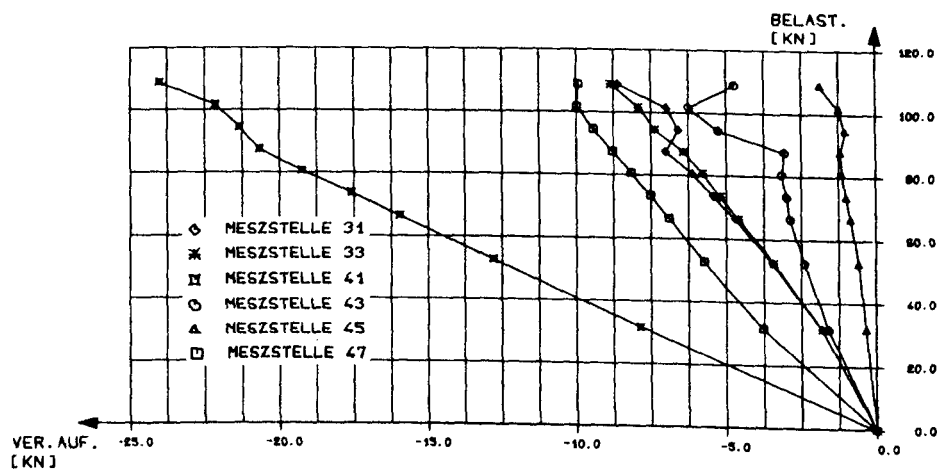
Versuchskörper Treppe 1



a)



b)

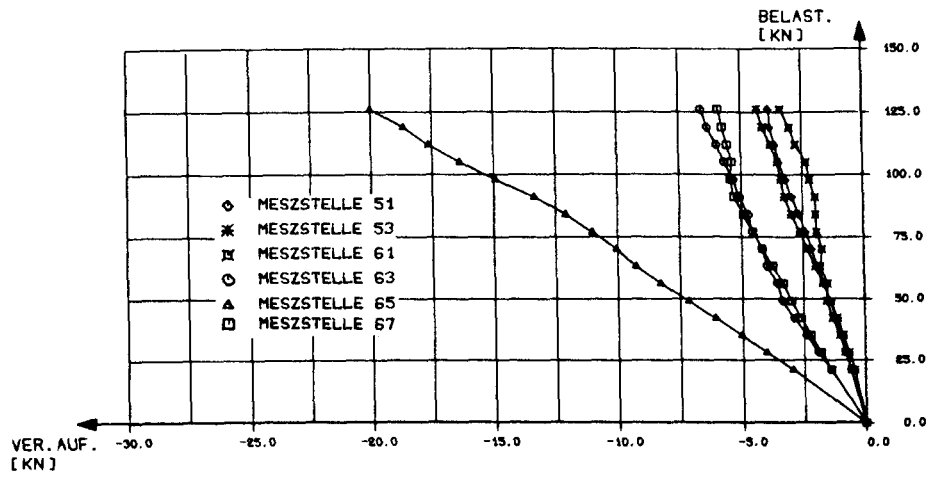


c)

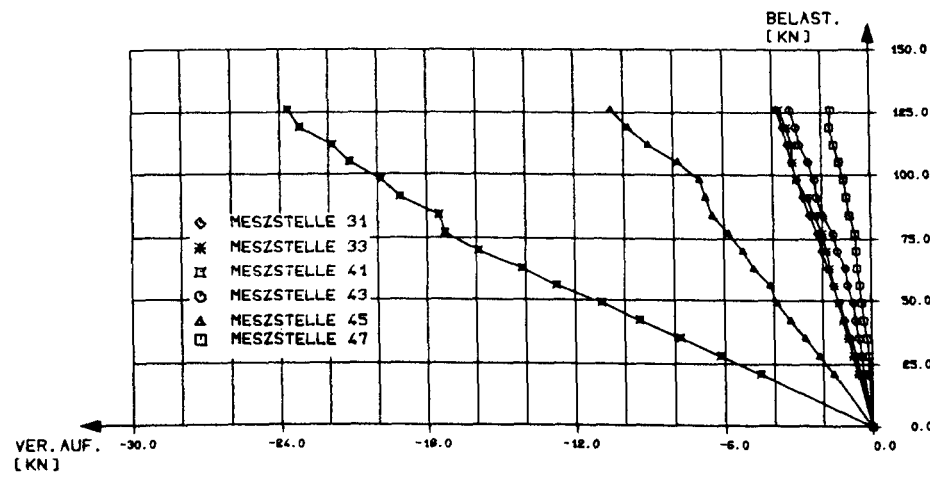
vertikale Auflagerkräfte im

- a) Bruchlastzyklus 1 am oberen Podest
- a) Bruchlastzyklus 1 am unteren Podest
- a) Bruchlastzyklus 2 am unteren Podest

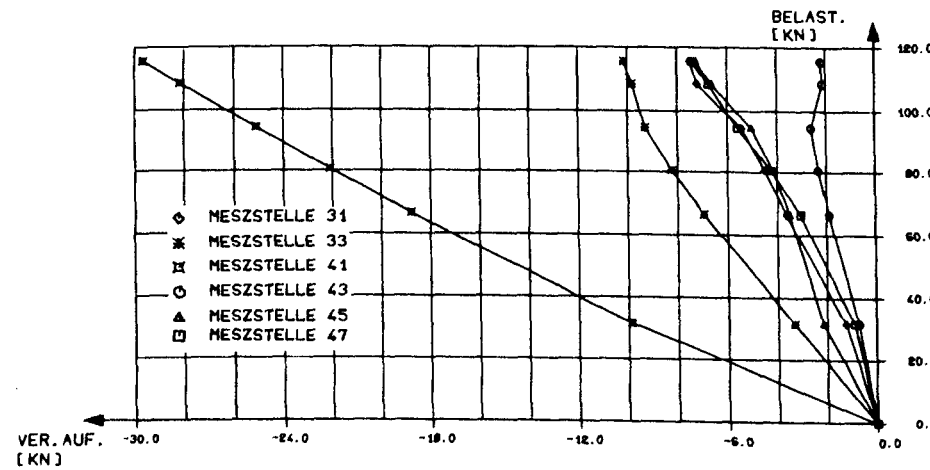
Versuchskörper Treppe 2



a)



b)



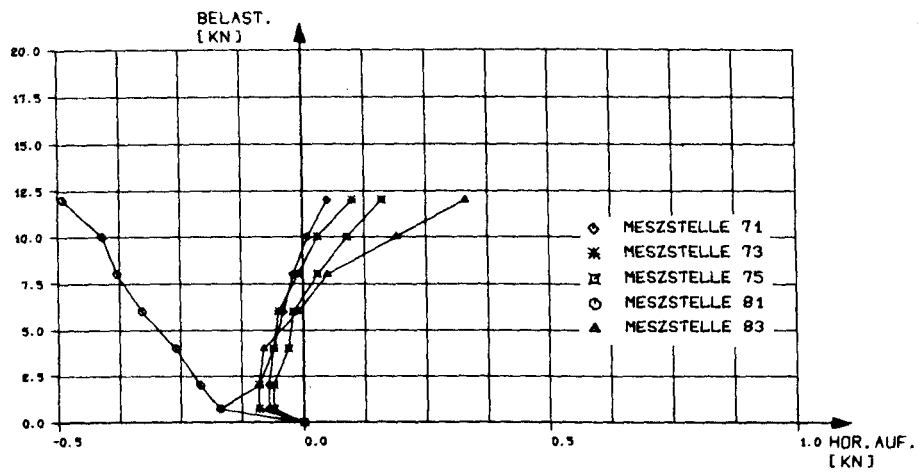
c)

vertikale Auflagerkräfte im

- a) Bruchlastzyklus 1 am oberen Podest
- a) Bruchlastzyklus 1 am unteren Podest
- a) Bruchlastzyklus 2 am unteren Podest

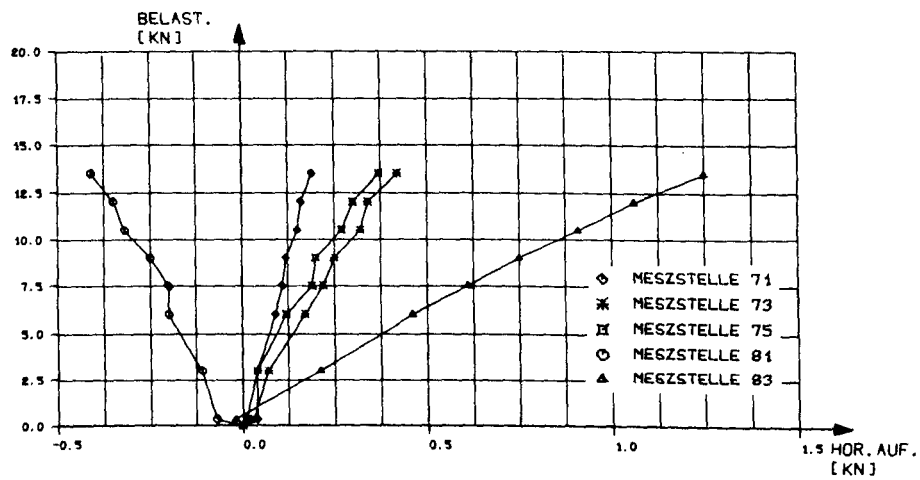
Versuchskörper Treppe 1

horizontale Auflagerkräfte in den Gebrauchslastzyklen

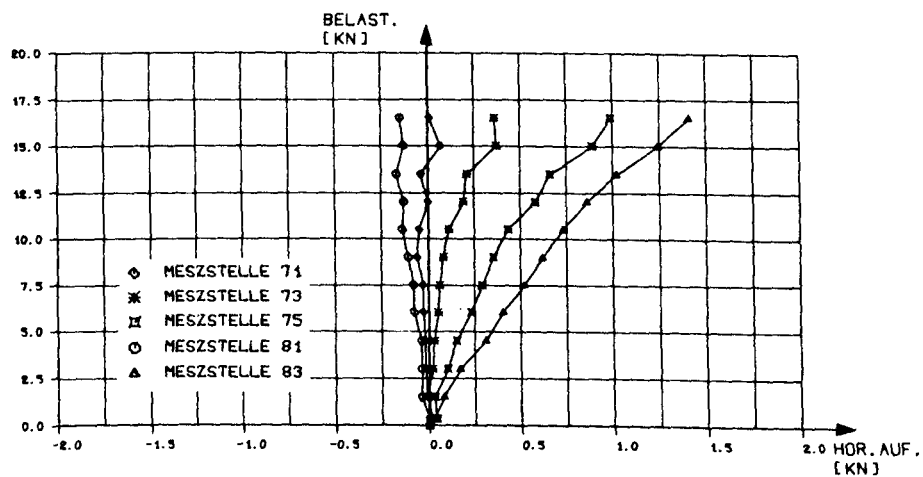


Belastung auf:

oberem Podest



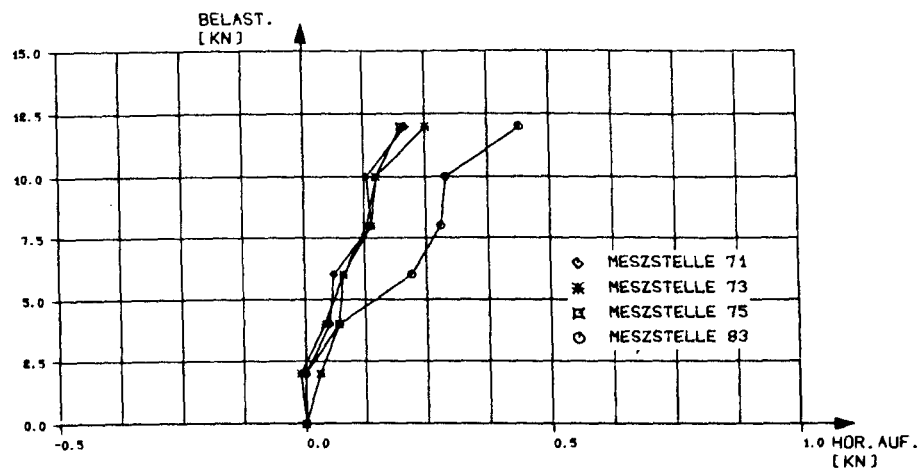
oberem Lauf



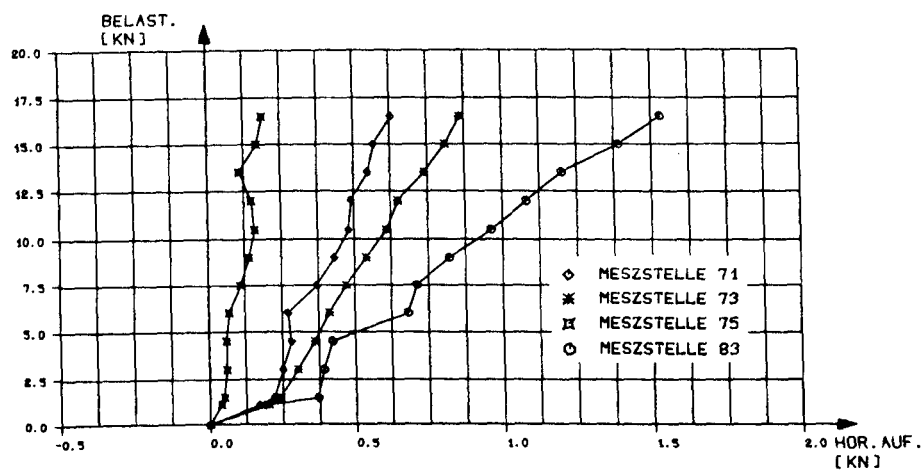
unterem Lauf

Versuchskörper Treppe 2

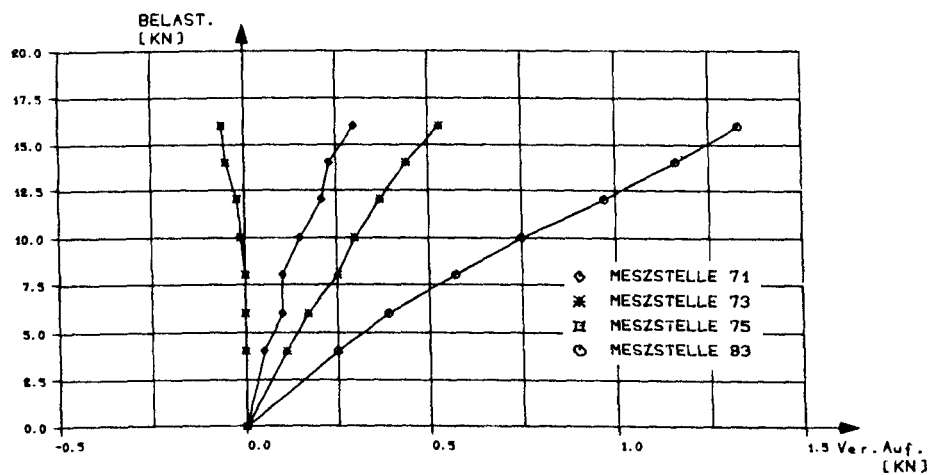
horizontale Auflagerkräfte in den Gebrauchslastzyklen



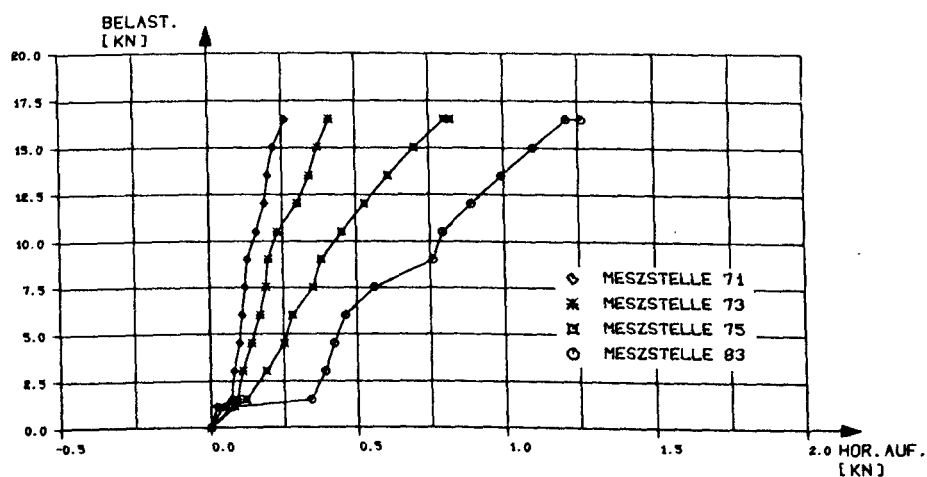
oberem Podest



oberem Lauf



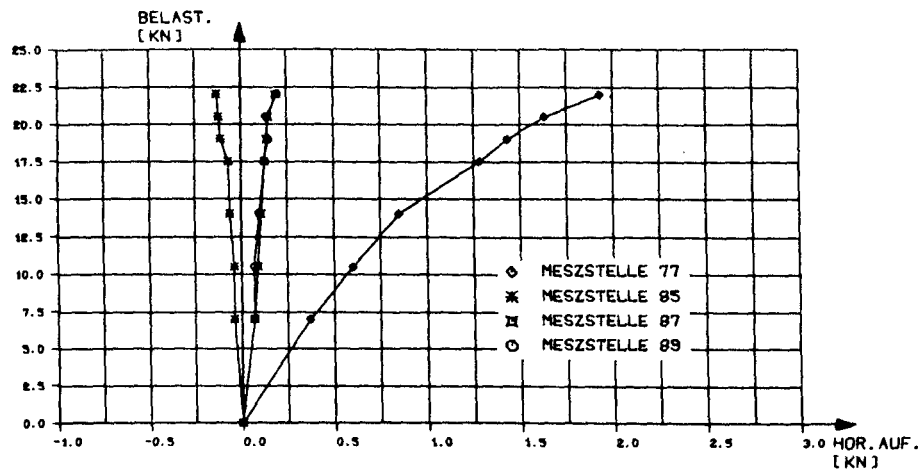
unterem Podest



unterem Lauf

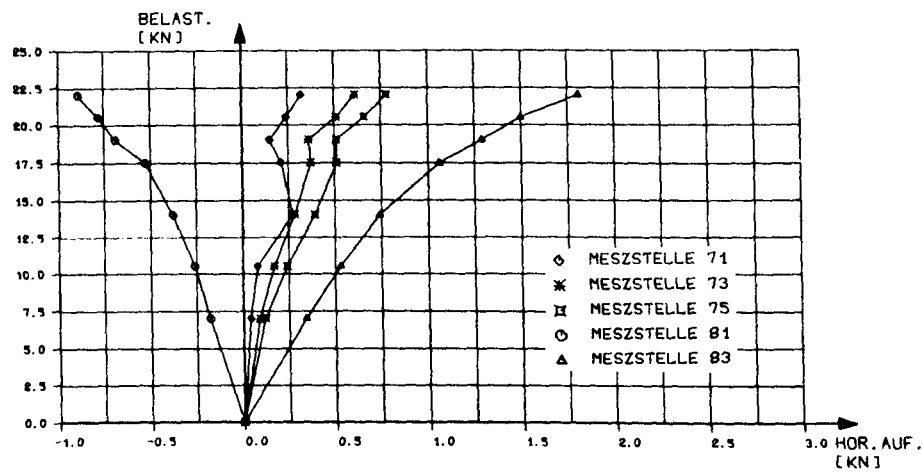
Versuchskörper Treppe 1

horizontale Auflagerkräfte in den Gebrauchslastzyklen

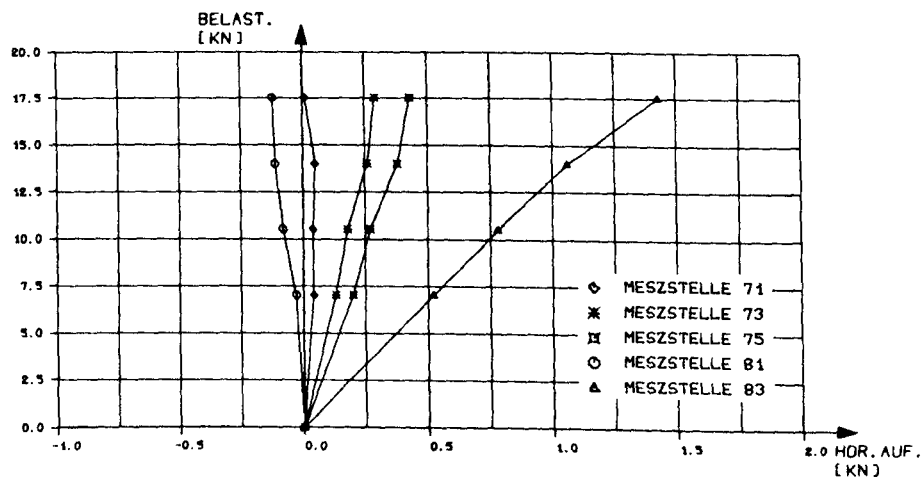


Belastung auf:

oberem Lauf
oberem Podest



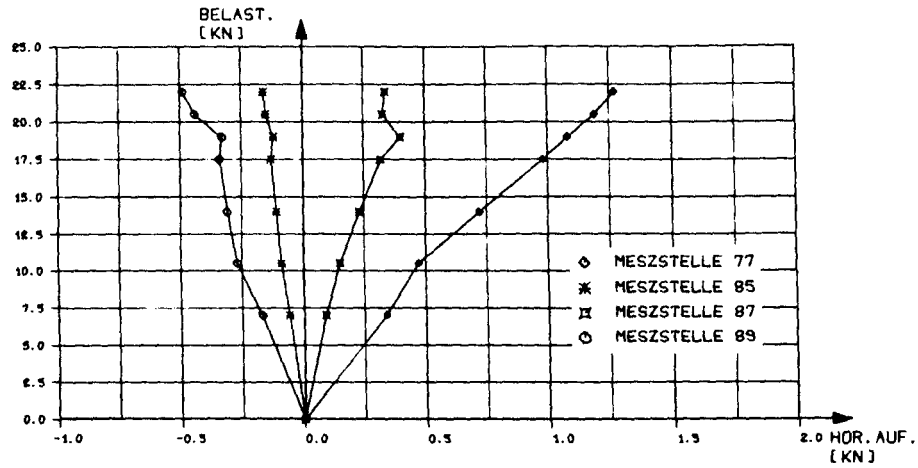
oberem Lauf
oberem Podest



unterem Lauf
unterem Podest

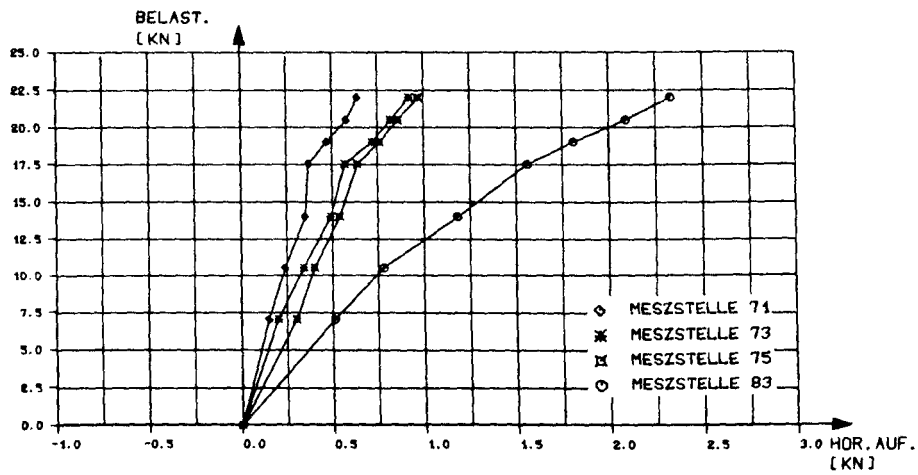
Versuchskörper Treppe 2

horizontale Auflagerkräfte in den Gebrauchslastzyklen

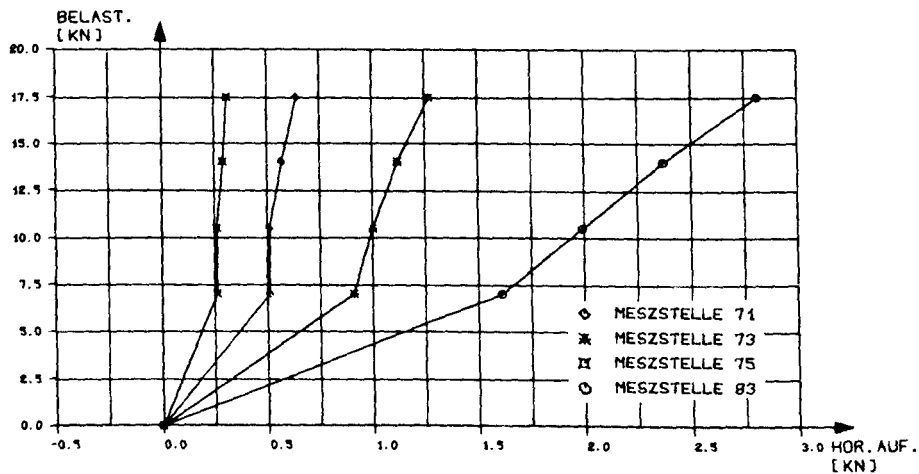


Belastung auf:

oberem Lauf
oberem Podest

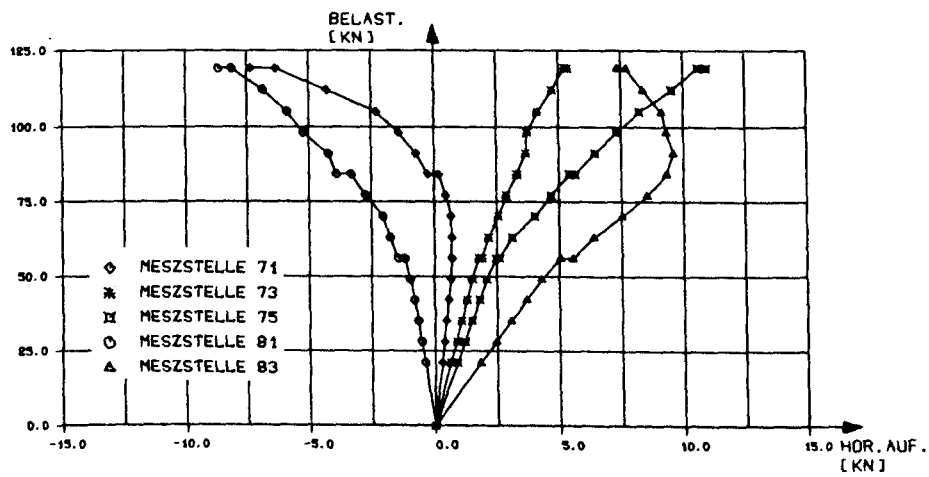
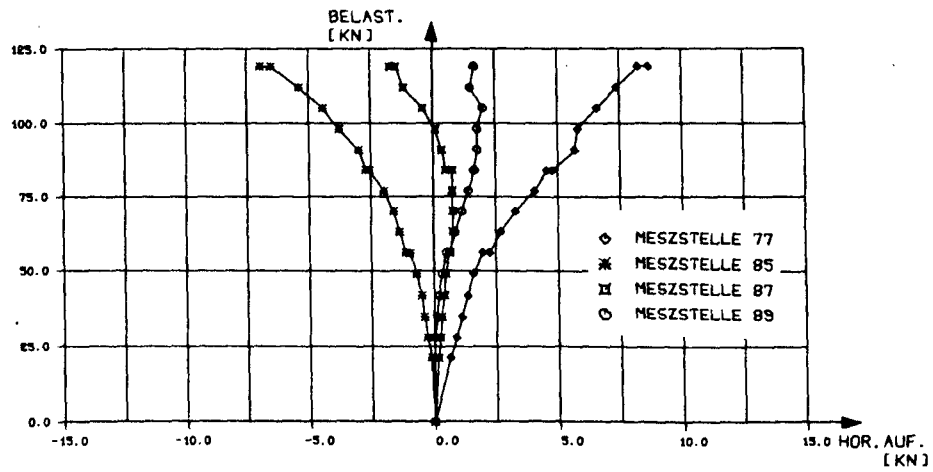


oberem Lauf
oberem Podest



unterem Lauf
unterem Podest

Versuchskörper Treppe 1

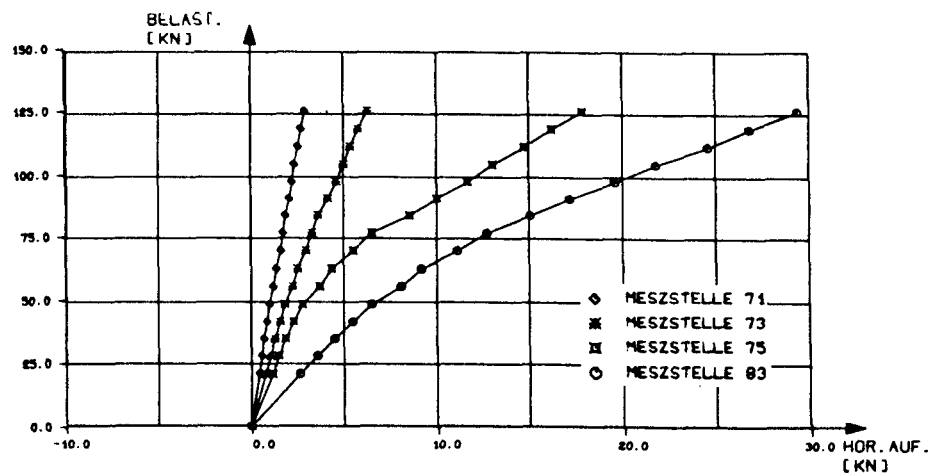
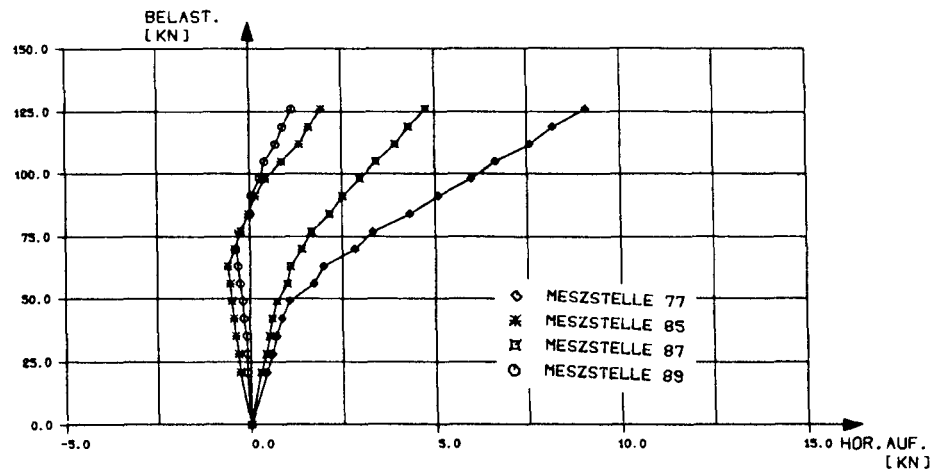


horizontale Auflagerkräfte bei Belastung des Gesamtsystems in
Bruchlastzyklus 1

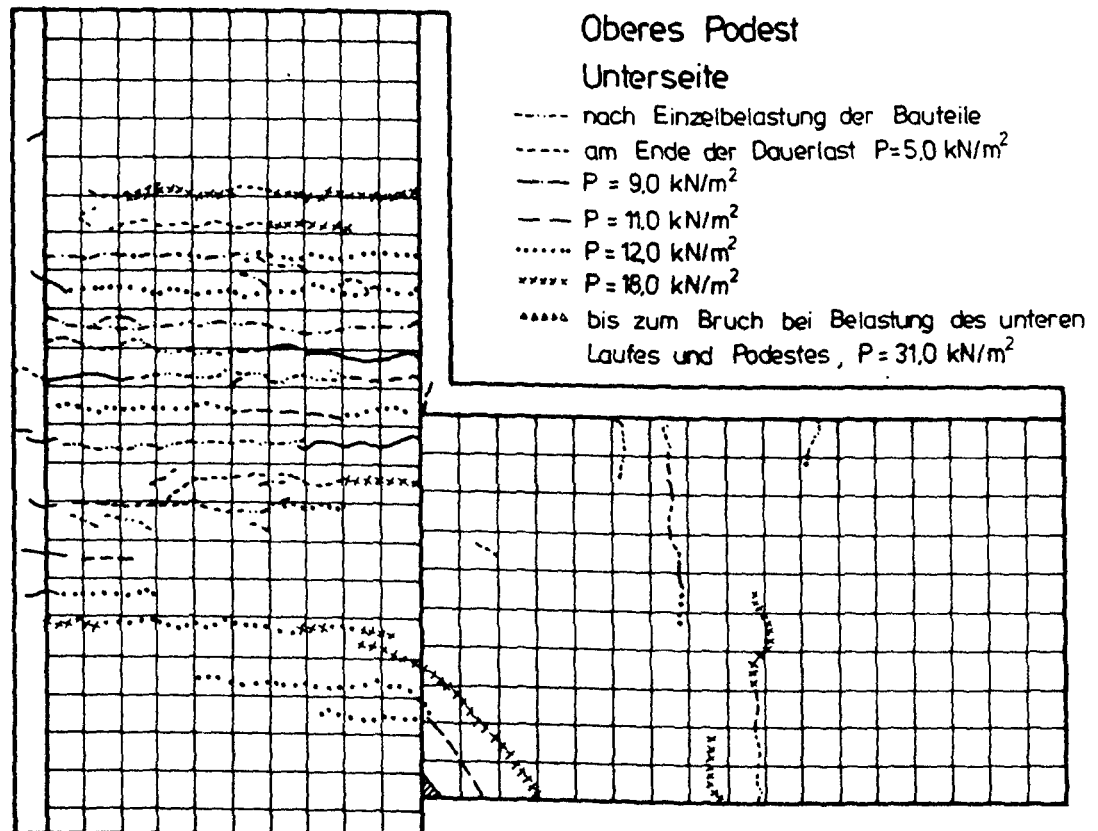
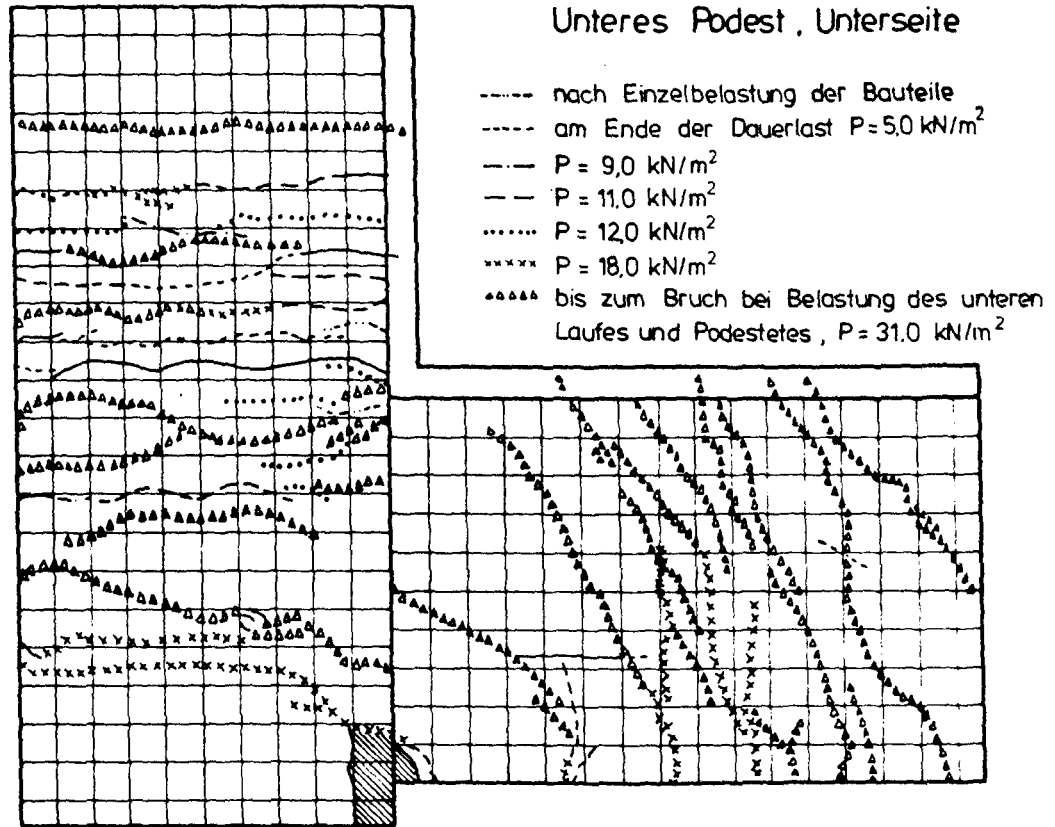
Versuchskörper Treppe 2

Treppe

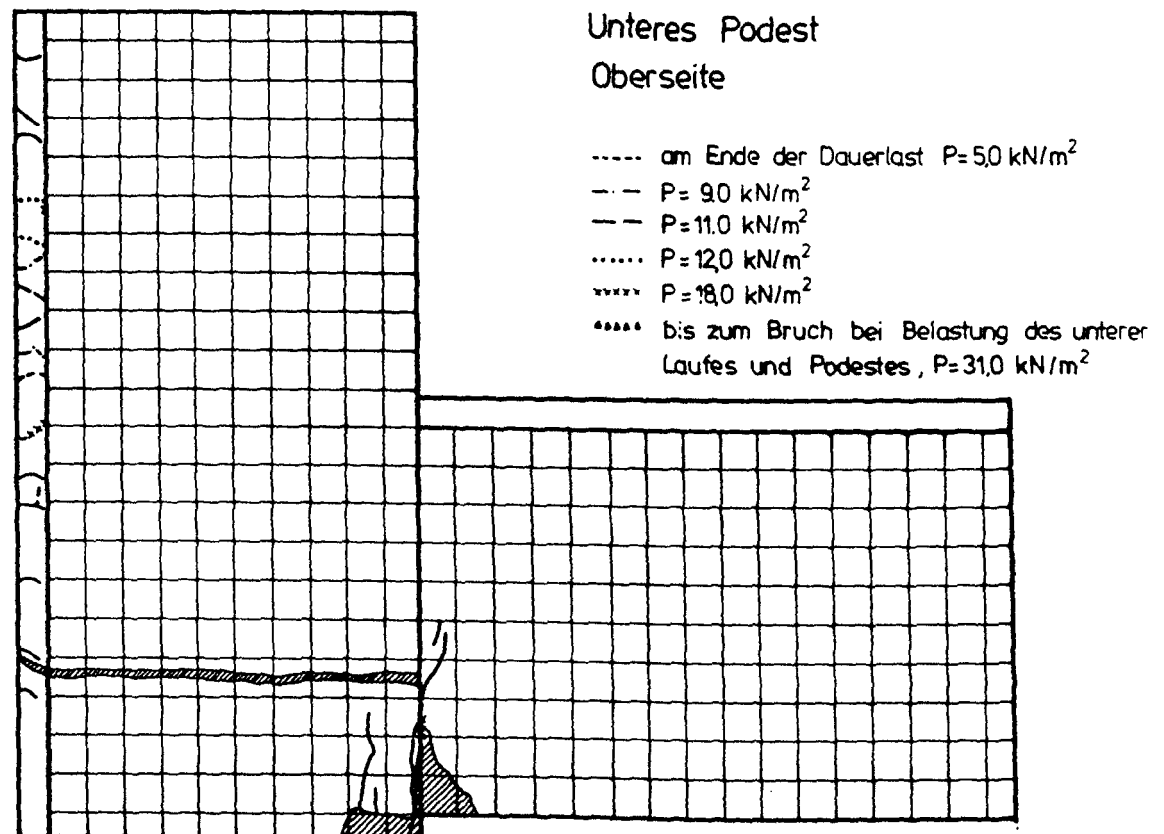
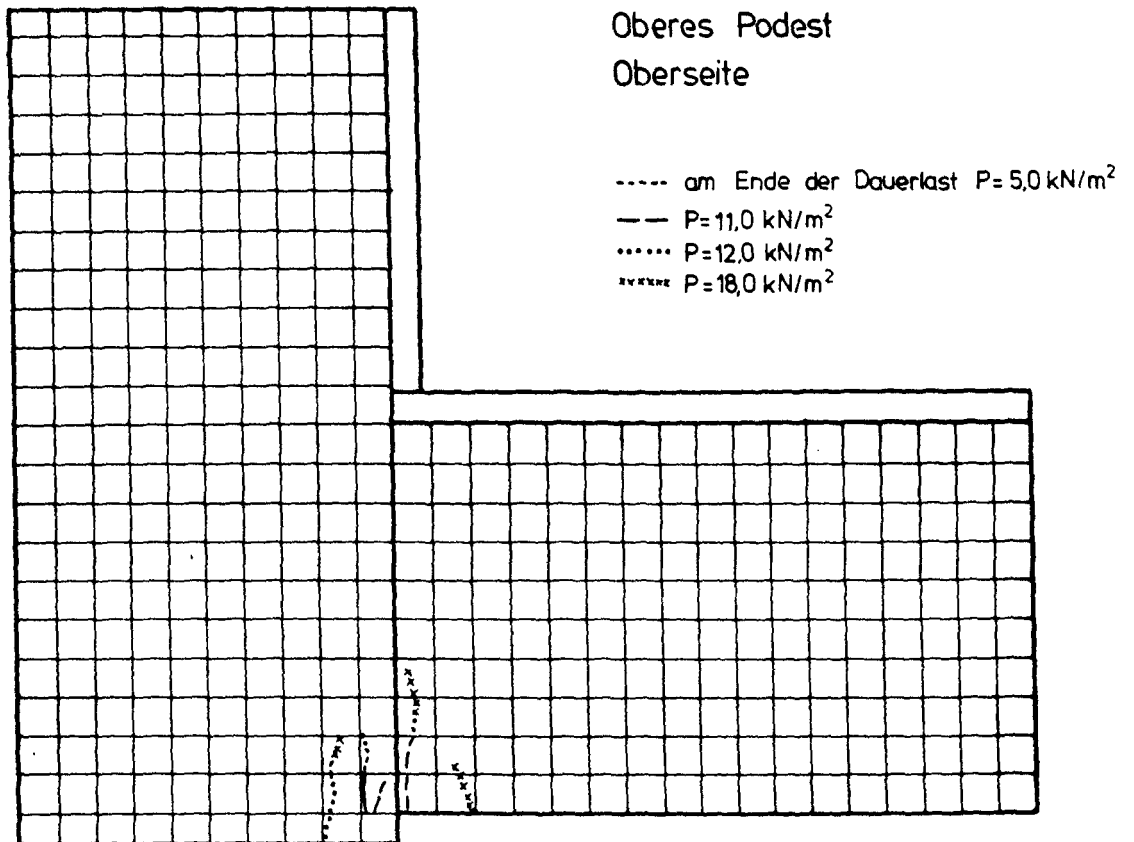
horiz. Auflagerkr., Belast. des Gesamtsystems bis zum Bruch



horizontale Auflagerkräfte bei Belastung des Gesamtsystems in
Bruchlastzyklus 1



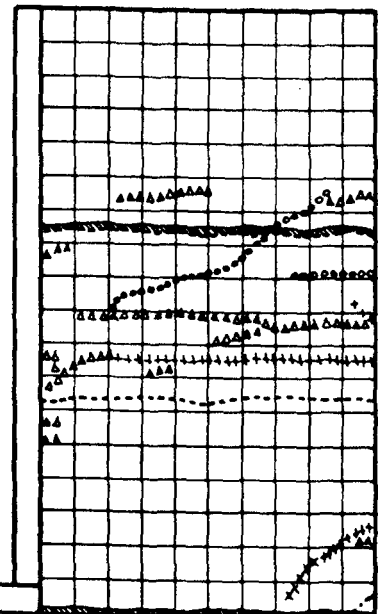
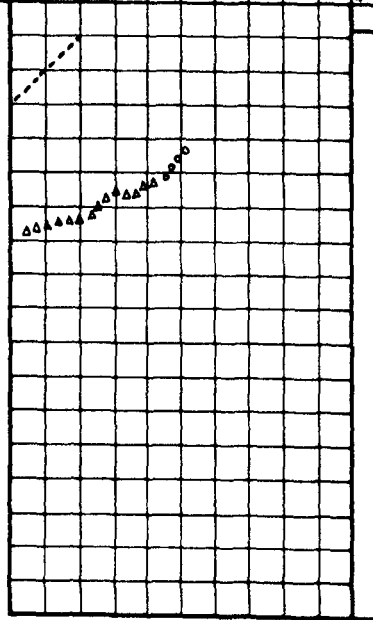
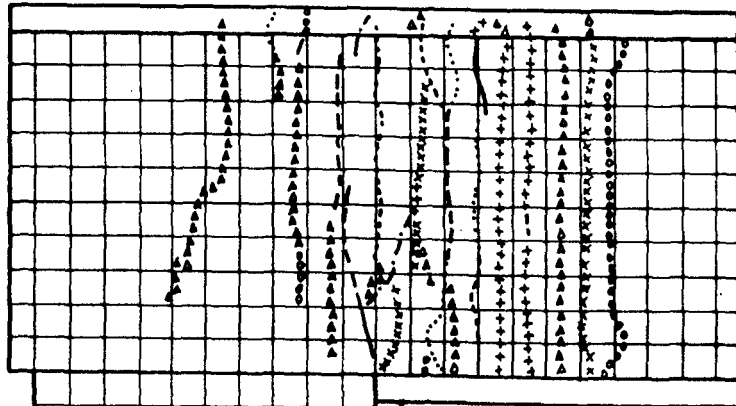
Rißentwicklung an der Unterseite von Versuchskörper Treppe 1



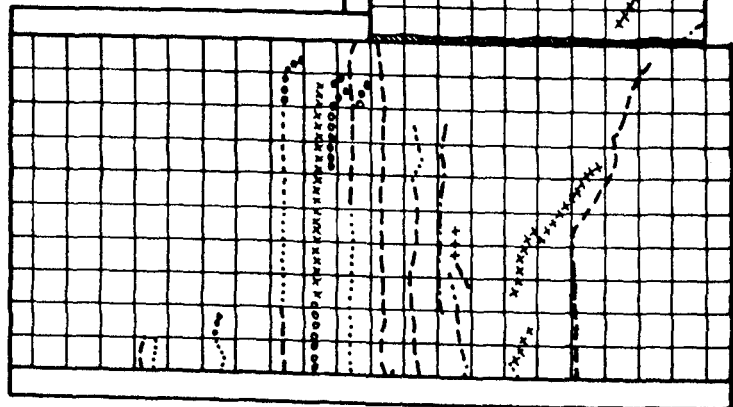
Rißentwicklung an der Oberseite von Versuchskörper Treppe 1

- nach Einzelbelastung der Bauteile
- - Beginn Dauerlast
- $P = 7,0 \text{ kN/m}^2$
- - - $P = 9,0 \text{ kN/m}^2$
- $P = 11,0 \text{ kN/m}^2$
- ++++ $P = 13,0 \text{ kN/m}^2$
- xxxx $P = 15,0 \text{ kN/m}^2$
- ΔΔΔΔ $P = 17,0 \text{ kN/m}^2$
- oooo $P = 18,0 \text{ kN/m}^2$
- ▨ Bruch

Oberes Podest
Unterseite



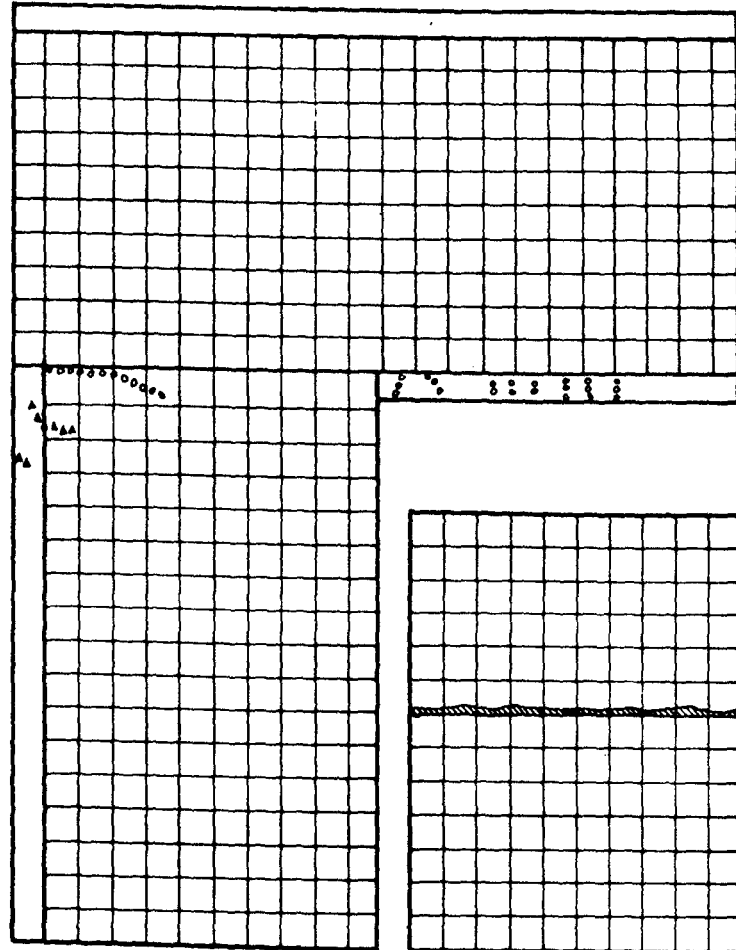
Unteres Podest
Unterseite



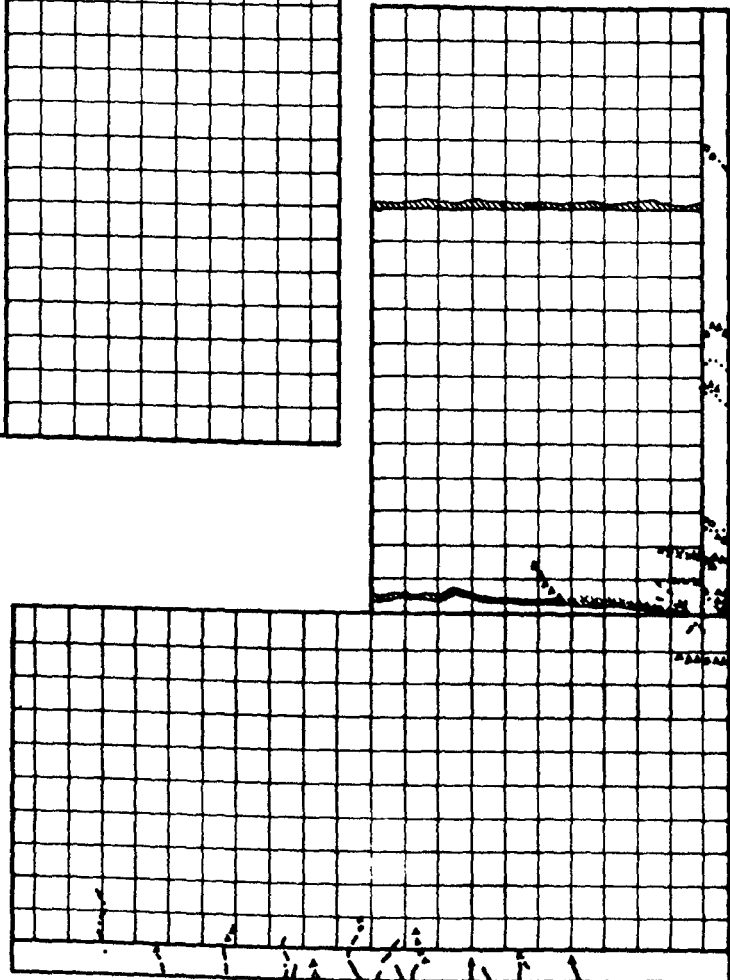
Rißentwicklung an der Unterseite von Versuchskörper Treppe 2

- Beginn Dauerlast
- - - P = 7,0 kN/m²
- · - P = 9,0 kN/m²
- P = 11,0 kN/m²
- ~~~~~ P = 15,0 kN/m²
- ~~~~~ P = 17,0 kN/m²
- ~~~~~ P = 18,0 kN/m²
- ▨ Bruch

Oberes Podest
Oberseite



Unteres Podest
Oberseite



Rißentwicklung an der Oberseite von Versuchskörper Treppe 2

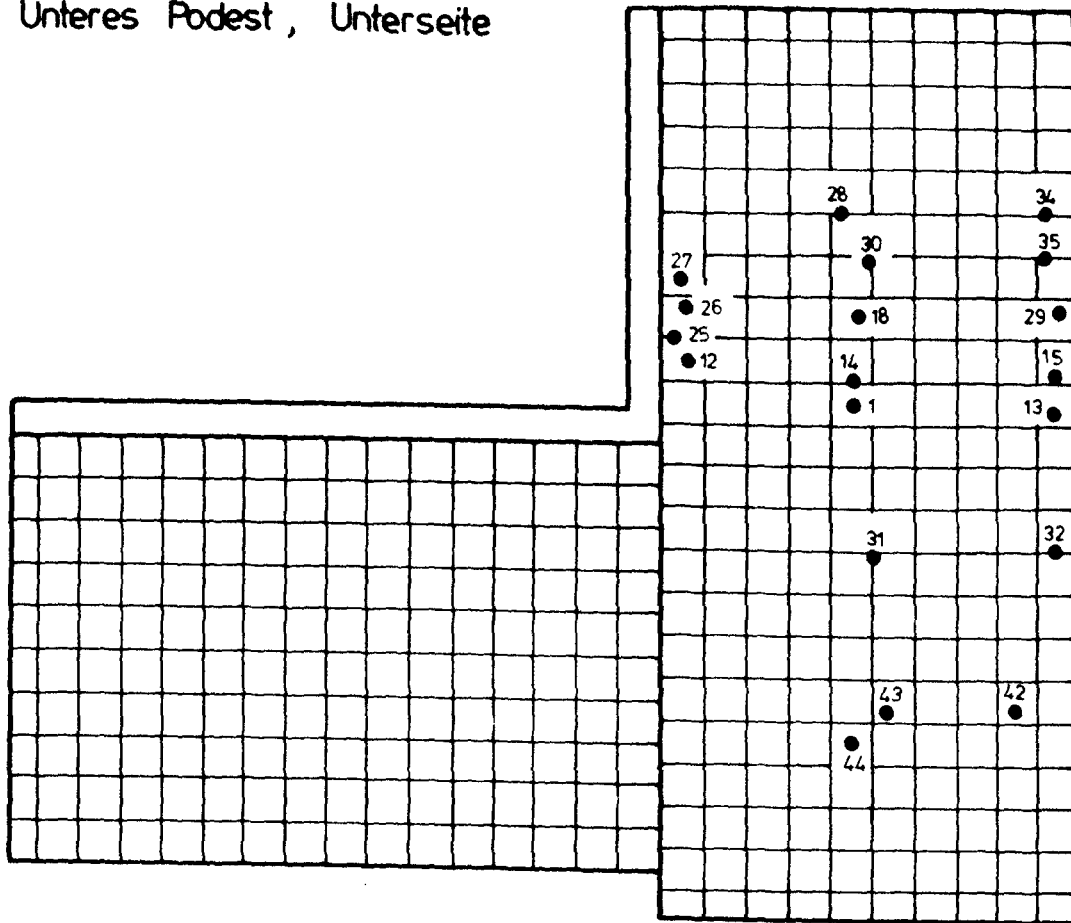
Bauteil	Messpkt.	Rissbreite in mm nach Laststufe									
		51	52	54	62	66	70	80	83	85	87
oberes Podest	2				0,07	0,08	0,08	0,10	0,24	0,34	0,42
	3	0,07	0,09	0,14	0,35	0,30	0,34	0,38	0,38	0,42	0,42
	4	0,09	0,12	0,20	0,22	0,24	0,25	0,32	0,32	0,33	0,34
	5	0,11	0,10	0,16	0,21	0,24	0,24	0,30	0,34	0,36	0,36
	6	0,18	0,18	0,17	0,28	0,36	0,34	0,38	0,42	0,45	0,52
	7	0,07	0,05	0,06	0,07	0,07	0,12	0,18	0,22	0,25	0,38
	8		0,06	0,06	0,05	0,07	0,07	0,13	0,17	0,14	0,14
	10			0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	11			0,16	0,15	0,15	0,15	0,28	0,34	0,38	0,42
	18						0,06	0,06	0,07	0,09	0,14
	20						0,07	0,08	0,32	0,30	0,32
	21							0,04	0,13	0,18	0,21
	22							0,06	0,18	0,22	0,24
	24								0,22	0,22	0,28
	36									0,06	0,25
	37									0,07	0,08
	38									0,24	0,28
	39									0,20	0,21
	40									0,22	0,22
oberer Lauf	9			0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	23								0,38	0,65	0,86
	33								0,22	0,36	0,41
unteres Podest	1	0,07	0,07	0,08	0,20	0,20	0,23	0,26	0,28	0,28	0,34
	12				0,07	0,11	0,11	0,12	0,14	0,17	0,20
	13				0,22	0,24	0,28	0,32	0,34	0,34	0,32
	14				0,08	0,08	0,09	0,12	0,16	0,20	0,28
	15				0,06	0,07	0,07	0,14	0,17	0,22	0,24
	16				0,07	0,08	0,08	0,10	0,24	0,34	0,42
	17					0,04	0,05	0,05	0,07	0,08	0,09
	18						0,04	0,08	0,21	0,24	0,26
	26								0,14	0,14	0,16
	27								0,10	0,14	0,15
	28								0,04	0,06	0,05
	29								0,28	0,32	0,36
	30								0,04	0,32	0,34
	31								0,11	0,13	0,16
	32								0,24	0,30	0,33

Anlage A44: Rißbreiten des Versuchskörpers Treppe 1 in mm

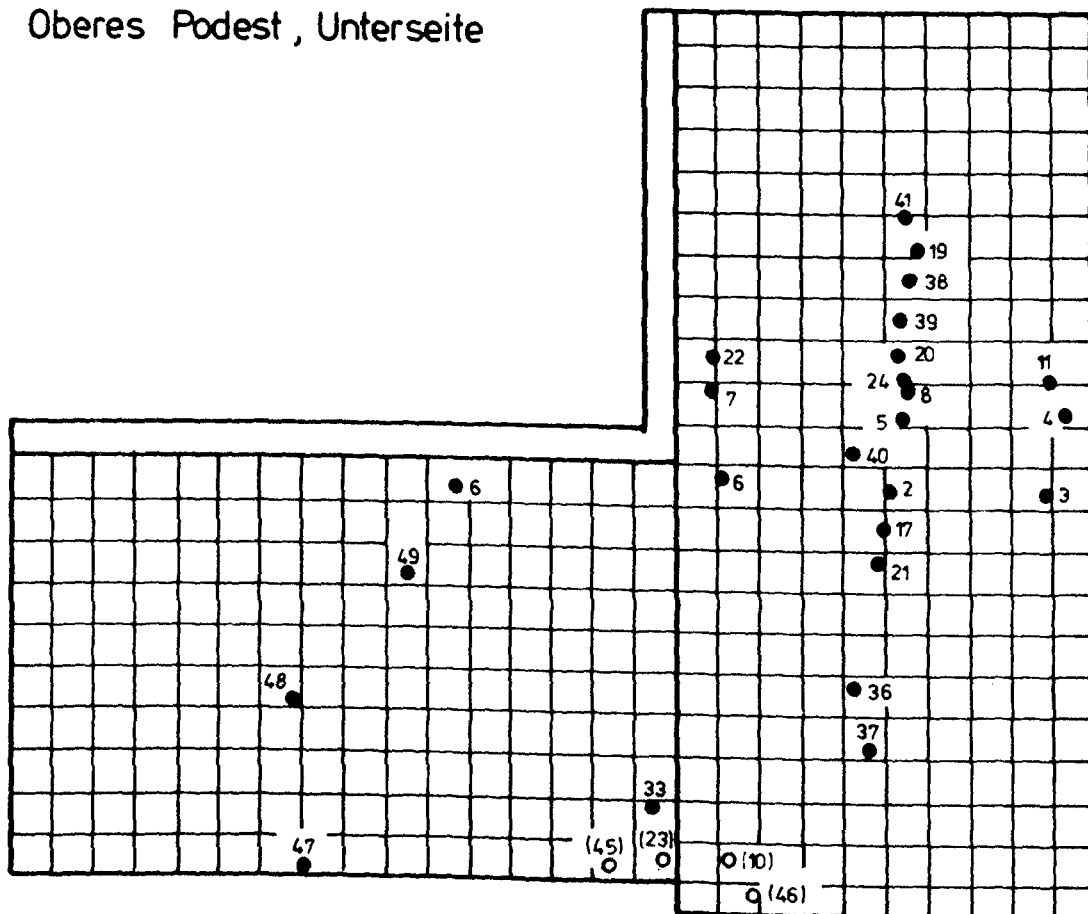
Bauteil	Messpkt.	Rissbreite in mm nach Laststufe													
		59	60	61	63	64	65	70	75	81	83	85	87	89	91
oberes Podest		Gebrauchslastzyklen							Bruchlastzyklus 1						
	1	0,16	0,20	0,22	0,22	0,22	0,25	0,26	0,22	0,28	0,32	0,32	0,34	0,44	0,40
	2	0,05	0,06				0,06	0,08	0,05	0,06	0,08		0,08	0,10	0,14
	3	0,05	0,07	0,07	0,08		0,08	0,11	0,05	0,10	0,10	0,11	0,12	0,15	0,15
	4	0,11	0,14	0,15	0,16	0,18	0,20	0,22	0,16	0,22	0,24	0,25	0,26	0,30	0,35
	18			0,01	0,02	0,03	0,12	0,20	0,14	0,20	0,23	0,24	0,26	0,26	0,42
	19				0,04	0,05	0,05	0,07	0,06	0,18	0,20	0,24	0,26	0,30	0,30
	20						0,12	0,16	0,12	0,18	0,21	0,24	0,26	0,28	0,34
	21						0,12	0,20	0,17	0,20	0,22	0,24	0,28	0,32	0,30
	24						0,03	0,03	0,03	0,11	0,20	0,24	0,24	0,28	0,32
	25											0,14	0,16	0,20	0,24
	26											0,24	0,26	0,30	0,34
	27												0,16	0,18	0,24
	32											0,15	0,18	0,22	0,20
	33											0,20	0,24	0,28	0,30
	34											0,18	0,20	0,22	0,32
	37												0,07	0,12	0,16
	39												0,10	0,14	0,16
	40												0,12	0,16	0,20
	41												0,18	0,20	0,24
	42												0,14	0,20	0,22
	43												0,15	0,18	0,18
	45												0,16	0,22	0,32
	52													0,14	0,20
	53												0,16		0,18
ob.Lauf	31									0,08	0,10	0,16	0,18	0,26	
unteres Podest	5	0,05		0,05	0,06	0,07	0,08	0,08	0,06	0,10	0,11	0,14	0,16	0,16	
	6	0,05		0,05	0,07	0,08	0,11	0,10	0,07	0,12	0,13	0,16	0,16	0,17	
	7	0,16	0,15	0,14	0,15	0,15	0,20	0,18	0,16	0,20	0,24	0,24	0,26	0,24	
	8	0,05	0,06	0,05	0,06	0,05	0,07	0,06	0,06	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	
	9	0,07	0,08	0,07	0,06	0,07	0,08	0,08	0,07	0,11	0,15	0,20	0,20	0,18	
	10	0,04	0,05	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,05	0,08	0,08	0,12	0,13	0,12	
	11	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08	0,11	0,12	0,07	0,13	0,14	0,16	0,20	0,20	
	12	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12	0,12	0,07	0,15		0,20	0,20	0,18	
	13	0,06		0,06	0,08	0,08	0,10	0,10	0,05	0,08	0,10	0,12	0,14	0,12	
	14	0,05	0,04	0,05				0,05	0,04	0,06		0,06	0,13		
	15	0,05		0,05	0,06	0,06	0,07	0,08	0,05	0,11	0,12	0,16	0,20	0,24	
	16	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,04	0,11	0,12	0,15	0,22	0,22	
	22						0,05		0,05	0,07	0,10	0,14	0,18	0,18	
	23									0,05		0,05	0,11	0,16	
	28									0,03	0,04	0,06	0,06	0,07	
	29										0,06	0,12	0,15	0,16	0,18
unterer Lauf	17	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,04	0,12	0,15	0,22	0,24	0,30	0,40
	30										0,05	0,09	0,13	0,16	0,20
	35											0,07	0,10	0,10	0,12
	36											0,08	0,13	0,18	0,18
	46												0,04	0,06	0,07

Anlage A45: Rißbreiten des Versuchskörpers Treppe 2 in mm

Unteres Podest , Unterseite

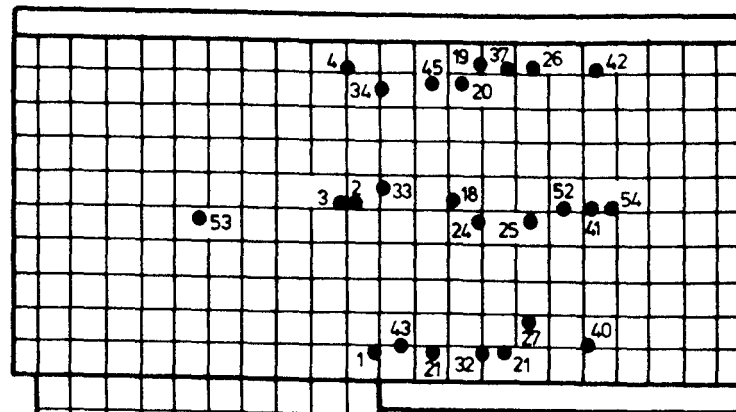


Oberes Podest , Unterseite

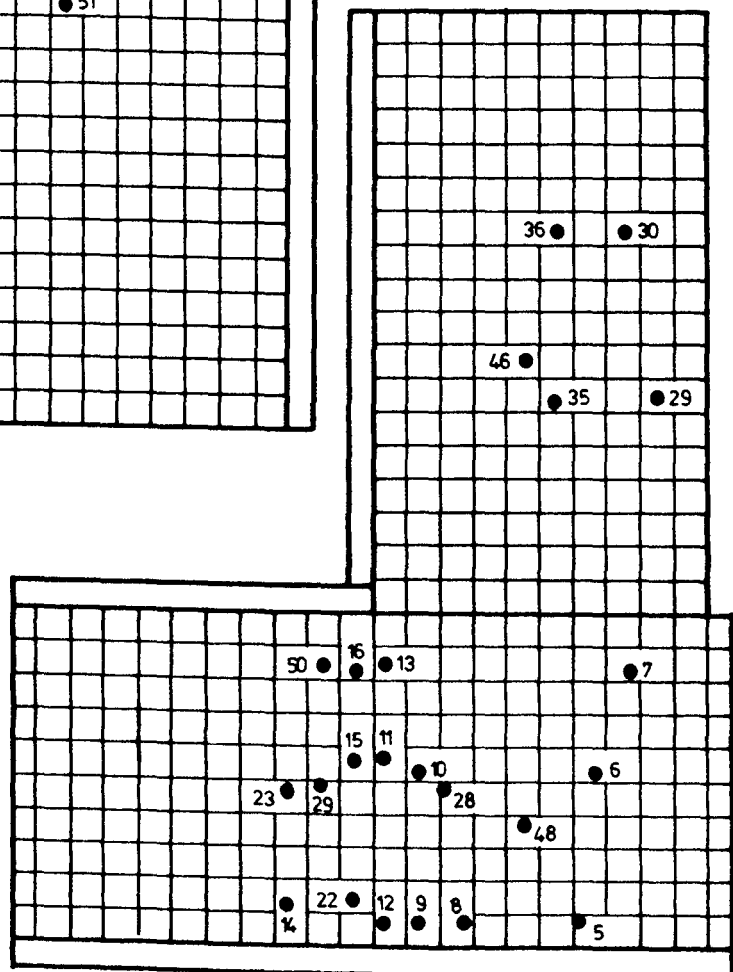


Lage der Rißbreitenmeßpunkte bei Versuchskörper Treppe 1

Oberes Podest
Unterseite



Unteres Podest
Unterseite



Lage der Rißbreitenmeßpunkte bei Versuchskörper Treppe 2

oberes Podest:

Durchbiegungen in mm

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	W 23	W 24	W 25	W 27	W 28	W 29	W 30
1	21.00	3.00	I	0.685	1.265	0.770	1.210	0.695	1.180	0.715
2	28.00	4.00	I	0.915	1.690	1.030	1.615	0.930	1.580	0.965
3	35.00	5.00	I	1.135	2.100	1.280	2.010	1.145	1.955	1.195
4	42.00	6.00	I	1.355	2.510	1.530	2.390	1.360	2.330	1.425
5	49.00	7.00	I	1.620	3.005	1.835	2.860	1.620	2.795	1.710
6	56.00	8.00	I	1.990	3.710	2.270	3.565	1.995	3.495	2.160
7	56.00	8.00	I	2.355	4.440	2.815	4.320	2.360	4.290	2.735
8	63.00	9.00	I	2.915	5.435	3.505	5.310	2.875	5.285	3.450
9	70.00	10.00	I	3.980	7.025	4.410	6.905	3.900	6.875	4.370
10	77.00	11.00	I	5.085	8.995	6.060	8.865	4.960	8.845	6.075
11	84.00	12.00	I	6.245	11.070	7.330	10.885	6.090	10.870	7.350
12	84.00	12.00	I	6.930	12.200	8.285	12.015	6.825	12.045	8.350
13	91.00	13.00	I	8.630	14.595	10.390	14.475	8.685	14.460	10.440
14	98.00	14.00	I	10.280	17.310	12.225	17.055	10.230	17.015	12.200
15	105.00	15.00	I	12.340	20.345	14.245	20.065	12.250	20.000	14.240
16	112.00	16.00	I	15.480	24.840	17.020	24.575	15.125	24.580	16.990
17	119.00	17.00	I	18.230	29.585	20.200	29.225	17.675	29.415	20.250
18	119.00	17.00	I	19.730	32.085	21.835	31.700	18.955	31.720	21.805
19	126.00	18.00	I	22.715	37.060	25.630	36.675	21.700	36.730	25.640

oberer Lauf :

Durchbiegungen in mm

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	W 14	W 15	W 16	W 17
1	21.00	3.00	I	0.560	0.990	0.875	0.850
2	28.00	4.00	I	0.750	1.330	1.175	1.150
3	35.00	5.00	I	0.940	1.650	1.465	1.435
4	42.00	6.00	I	1.130	1.975	1.750	1.725
5	49.00	7.00	I	1.345	2.365	2.095	2.070
6	56.00	8.00	I	1.615	2.860	2.530	2.515
7	56.00	8.00	I	1.805	3.285	2.885	2.890
8	63.00	9.00	I	2.205	3.975	3.515	3.540
9	70.00	10.00	I	2.820	5.040	4.505	4.600
10	77.00	11.00	I	3.470	6.265	5.600	5.755
11	84.00	12.00	I	4.240	7.750	6.885	7.055
12	84.00	12.00	I	4.690	8.510	7.615	7.805
13	91.00	13.00	I	5.630	10.015	9.090	9.415
14	98.00	14.00	I	6.810	12.145	10.960	11.295
15	105.00	15.00	I	8.210	14.480	13.135	13.495
16	112.00	16.00	I	11.425	19.295	17.815	18.055
17	119.00	17.00	I	13.045	22.380	20.545	21.015
18	119.00	17.00	I	13.915	23.980	21.970	22.545
19	126.00	18.00	I	15.535	26.850	24.745	25.615

Tabelle A1:

**Durchbiegungen der
Treppe 1 im
Bruchlastzyklus 1**

unteres Podest:

Durchbiegungen in mm

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	W 5	W 6	W 7	W 8	W 10	W 11	W 12
<hr/>										
1	21.00	3.00	I	0.555	0.800	0.365	0.760	0.350	0.755	0.430
2	28.00	4.00	I	0.740	1.070	0.525	1.015	0.530	1.005	0.570
3	35.00	5.00	I	0.930	1.335	0.685	1.265	0.710	1.245	0.710
4	42.00	6.00	I	1.105	1.590	0.845	1.510	0.885	1.490	0.845
5	49.00	7.00	I	1.325	1.900	1.025	1.805	1.095	1.785	1.010
<hr/>										
6	56.00	8.00	I	1.610	2.300	1.250	2.200	1.385	2.175	1.230
7	56.00	8.00	I	2.010	2.755	1.520	2.620	1.740	2.555	1.410
8	63.00	9.00	I	2.515	3.340	1.800	3.180	2.195	3.090	1.705
9	70.00	10.00	I	3.100	4.370	2.480	4.125	2.740	3.955	2.280
10	77.00	11.00	I	3.870	5.405	3.250	5.110	3.445	4.945	2.840
<hr/>										
11	84.00	12.00	I	5.545	6.795	3.980	6.445	5.030	6.185	3.495
12	84.00	12.00	I	6.105	7.400	4.335	7.045	5.640	6.770	3.845
13	91.00	13.00	I	7.020	8.570	5.050	8.185	6.590	7.955	4.485
14	98.00	14.00	I	8.230	10.675	22.285	9.655	7.840	9.735	5.575
15	105.00	15.00	I	9.410	12.420	22.210	12.395	9.090	11.495	6.505
<hr/>										
16	112.00	16.00	I	11.180	15.315	22.200	14.820	11.090	14.585	8.155
17	119.00	17.00	I	13.425	18.075	22.190	18.040	13.365	17.220	9.635
18	119.00	17.00	I	14.285	19.315	22.290	18.780	14.305	18.490	10.330
19	126.00	18.00	I	15.655	21.420	22.215	20.160	15.805	20.725	11.485

unterer Lauf :

Durchbiegungen in mm

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	W 18	W 19	W 20	W 21
<hr/>							
1	21.00	3.00	I	0.565	0.325	0.410	0.320
2	28.00	4.00	I	0.755	0.435	0.550	0.425
3	35.00	5.00	I	0.935	0.545	0.690	0.530
4	42.00	6.00	I	1.120	0.655	0.820	0.640
5	49.00	7.00	I	1.340	0.785	0.980	0.770
<hr/>							
6	56.00	8.00	I	1.620	0.950	1.180	0.920
7	56.00	8.00	I	1.825	1.025	1.285	0.980
8	63.00	9.00	I	2.185	1.225	1.535	1.155
9	70.00	10.00	I	2.760	1.600	1.920	1.440
10	77.00	11.00	I	3.405	1.960	2.340	1.730
<hr/>							
11	84.00	12.00	I	4.195	2.365	2.840	2.065
12	84.00	12.00	I	4.600	2.640	3.150	2.300
13	91.00	13.00	I	5.390	3.010	3.655	2.630
14	98.00	14.00	I	6.555	3.680	4.480	3.180
15	105.00	15.00	I	7.780	4.280	5.280	3.745
<hr/>							
16	112.00	16.00	I	10.120	5.485	7.000	5.145
17	119.00	17.00	I	11.910	6.300	8.160	6.005
18	119.00	17.00	I	12.885	6.795	8.885	6.665
19	126.00	18.00	I	14.420	7.435	9.840	7.375

Tabelle A2:

**Durchbiegungen der
Treppe 1 im
Bruchlastzyklus 1**

oberes Podest:

Durchbiegungen in mm / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	W 23	W 24	W 25	W 27	W 28	W 29	W 30
			I							
2	21.00	3.00	I	0.590	1.100	0.705	1.075	0.650	1.045	0.705
3	28.00	4.00	I	0.805	1.510	0.970	1.465	0.880	1.420	0.950
4	35.00	5.00	I	1.010	1.900	1.210	1.825	1.095	1.780	1.185
5	42.00	6.00	I	1.210	2.285	1.460	2.185	1.310	2.130	1.425
6	49.00	7.00	I	1.435	2.715	1.735	2.610	1.550	2.545	1.705
			I							
7	56.00	8.00	I	1.860	3.600	2.475	3.555	2.035	3.510	2.485
8	63.00	9.00	I	2.150	4.135	2.875	4.095	2.340	4.060	2.880
9	70.00	10.00	I	2.760	5.250	3.585	5.390	2.995	5.440	3.660
10	77.00	11.00	I	3.270	6.170	4.215	6.395	3.500	6.415	4.305
11	84.00	12.00	I	4.060	7.735	5.905	8.025	4.285	8.045	6.070
			I							
12	91.00	13.00	I	4.710	9.020	6.790	9.390	4.945	9.410	7.005
13	98.00	14.00	I	5.665	10.780	8.625	11.200	5.925	11.220	8.795
14	105.00	15.00	I	6.420	12.055	9.535	12.565	6.890	12.595	9.785
15	112.00	16.00	I	7.440	13.885	11.025	14.460	7.980	14.495	11.335
16	119.00	17.00	I	8.220	15.315	12.150	15.880	8.780	15.990	12.525
			I							
17	126.00	18.00	I	9.145	16.975	13.240	17.540	9.750	17.645	13.620

oberer Lauf :

Durchbiegungen in mm / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	W 14	W 15	W 16	W 17
			I				
2	21.00	3.00	I	0.415	0.800	0.670	0.695
3	28.00	4.00	I	0.555	1.100	0.935	0.950
4	35.00	5.00	I	0.695	1.380	1.155	1.190
5	42.00	6.00	I	0.825	1.660	1.415	1.430
6	49.00	7.00	I	0.970	1.965	1.660	1.690
			I				
7	56.00	8.00	I	1.185	2.455	2.070	2.125
8	63.00	9.00	I	1.360	2.830	2.425	2.485
9	70.00	10.00	I	1.650	3.445	2.960	3.075
10	77.00	11.00	I	1.945	4.045	3.485	3.615
11	84.00	12.00	I	2.395	5.010	4.245	4.455
			I				
12	91.00	13.00	I	2.770	5.830	4.970	5.200
13	98.00	14.00	I	3.380	7.025	5.995	6.250
14	105.00	15.00	I	3.800	7.835	6.660	7.000
15	112.00	16.00	I	4.400	9.020	7.680	8.165
16	119.00	17.00	I	4.880	10.050	8.530	9.020
			I				
17	126.00	18.00	I	5.525	11.265	9.575	10.060

Tabelle A3:

**Durchbiegungen der
Treppe 2 im
Bruchlastzyklus 1**

unteres Podest:

Durchbiegungen in mm / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	W 5	W 6	W 7	W 8	W 10	W 11	W 12
I										
2	21.00	3.00	I	0.460	0.800	0.510	0.745	0.475	0.795	0.465
3	28.00	4.00	I	0.635	1.120	0.720	1.060	0.650	1.105	0.640
4	35.00	5.00	I	0.800	1.425	0.915	1.350	0.815	1.390	0.815
5	42.00	6.00	I	0.965	1.715	1.100	1.630	0.980	1.675	0.980
6	49.00	7.00	I	1.145	2.025	1.300	1.940	1.150	1.985	1.170
I										
7	56.00	8.00	I	1.400	2.480	1.590	2.415	1.405	2.490	1.480
8	63.00	9.00	I	1.630	2.865	1.865	2.850	1.645	2.870	1.720
9	70.00	10.00	I	1.940	3.435	2.220	3.415	1.955	3.455	2.065
10	77.00	11.00	I	2.250	3.950	2.570	3.955	2.265	4.030	2.400
11	84.00	12.00	I	2.750	4.835	3.155	4.835	2.750	4.950	3.005
I										
12	91.00	13.00	I	3.180	5.575	3.595	5.530	3.160	5.700	3.405
13	98.00	14.00	I	3.845	6.610	4.180	6.545	3.775	6.880	3.975
14	105.00	15.00	I	4.245	7.245	4.550	7.190	4.190	7.665	4.370
15	112.00	16.00	I	4.820	8.185	5.100	8.150	4.795	8.855	4.990
16	119.00	17.00	I	5.400	9.055	5.570	9.040	5.320	9.905	5.470
I										
17	126.00	18.00	I	5.975	9.980	6.110	9.970	5.905	11.145	5.985

unterer Lauf :

Durchbiegungen in mm / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	W 18	W 19	W 20	W 21
I							
2	21.00	3.00	I	0.575	0.355	0.420	0.290
3	28.00	4.00	I	0.785	0.480	0.575	0.395
4	35.00	5.00	I	0.990	0.605	0.720	0.500
5	42.00	6.00	I	1.195	0.725	0.870	0.605
6	49.00	7.00	I	1.415	0.865	1.035	0.725
I							
7	56.00	8.00	I	1.755	1.070	1.270	0.880
8	63.00	9.00	I	2.020	1.245	1.470	1.040
9	70.00	10.00	I	2.410	1.490	1.750	1.230
10	77.00	11.00	I	2.845	1.845	2.105	1.460
11	84.00	12.00	I	3.580	2.540	2.770	1.995
I							
12	91.00	13.00	I	4.085	2.870	3.260	2.310
13	98.00	14.00	I	4.870	3.395	3.950	2.865
14	105.00	15.00	I	5.440	3.735	4.485	3.280
15	112.00	16.00	I	6.340	4.395	5.350	4.025
16	119.00	17.00	I	7.045	4.895	5.970	4.590
I							
17	126.00	18.00	I	7.810	5.375	6.670	5.215

Tabelle A4:

**Durchbiegungen der
Treppe 2 im
Bruchlastzyklus 1**

unteres Podest:

Durchbiegungen in mm / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	W 5	W 6	W 7	W 8	W 10	W 11	W 12
			I							
1	31.50	9.00	I	2.290	2.890	1.860	2.385	1.475	1.830	1.250
2	52.50	15.00	I	4.100	5.220	3.245	4.355	2.910	3.355	2.210
3	66.50	19.00	I	5.305	6.835	4.195	5.715	3.895	4.430	2.850
4	73.50	21.00	I	6.000	7.785	4.760	6.520	4.435	5.065	3.230
5	80.50	23.00	I	6.680	8.735	5.335	7.355	5.000	5.740	3.645
			I							
6	87.50	25.00	I	7.425	9.835	6.045	8.285	5.590	6.480	4.145
7	94.50	27.00	I	8.250	11.085	7.050	9.350	6.255	7.345	4.845
8	101.50	29.00	I	9.380	12.830	8.505	10.705	7.010	8.310	5.605
9	108.50	31.00	I	10.970	15.140	10.245	12.350	7.755	9.265	6.415

unterer Lauf :

Durchbiegungen in mm / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	W 18	W 19	W 20	W 21
			I				
1	31.50	9.00	I	1.745	1.435	1.640	1.425
2	52.50	15.00	I	3.145	2.495	2.905	2.510
3	66.50	19.00	I	4.190	3.280	3.855	3.350
4	73.50	21.00	I	4.805	3.750	4.425	3.830
5	80.50	23.00	I	5.445	4.230	4.990	4.320
			I				
6	87.50	25.00	I	6.180	4.855	5.680	4.910
7	94.50	27.00	I	7.080	5.675	6.530	5.635
8	101.50	29.00	I	8.065	6.575	7.485	6.460
9	108.50	31.00	I	9.045	7.485	8.430	7.275

**Tabelle A5: Durchbiegungen der Treppe 1
im Bruchlastzyklus 2**

oberes Podest:

Durchbiegungen in mm / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	W 23	W 24	W 25	W 27	W 28	W 29	W 30
			I							
2	31.50	9.00	I	0.780	1.625	1.155	1.335	0.675	1.150	0.735
3	66.50	19.00	I	1.960	4.075	2.725	3.580	1.840	3.225	2.140
4	80.50	23.00	I	2.505	5.200	3.450	4.590	2.370	4.170	2.790
5	94.50	27.00	I	3.065	6.355	4.210	5.640	2.915	5.160	3.480
6	108.50	31.00	I	3.625	7.520	4.970	6.730	3.485	6.175	4.195
			I							
7	115.50	33.00	I	3.930	8.170	5.385	7.310	3.790	6.735	4.575

oberer Lauf :

Durchbiegungen in mm

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	W 14	W 15	W 16	W 17
			I				
2	31.50	9.00	I	0.570	1.490	0.970	0.885
3	66.50	19.00	I	1.210	3.565	2.270	2.080
4	80.50	23.00	I	1.500	4.485	2.825	2.615
5	94.50	27.00	I	1.785	5.440	3.410	3.150
6	108.50	31.00	I	2.045	6.405	4.005	3.640
			I				
7	115.50	33.00	I	2.185	6.920	4.255	3.895

unteres Podest:

Durchbiegungen in mm

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	W 5	W 6	W 7	W 8	W 10	W 11	W 12
			I							
2	31.50	9.00	I	1.540	2.375	1.510	2.225	1.185	2.135	1.360
3	66.50	19.00	I	3.740	5.960	3.705	5.470	2.795	5.205	2.970
4	80.50	23.00	I	4.740	7.550	4.675	6.960	3.520	6.665	3.730
5	94.50	27.00	I	5.820	9.245	5.700	8.555	4.300	8.190	4.580
6	108.50	31.00	I	7.360	11.615	7.225	10.620	5.265	9.880	5.600
			I							
7	115.50	33.00	I	8.145	12.805	7.990	11.685	5.745	10.795	6.175

unterer Lauf :

Durchbiegungen in mm

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	W 18	W 19	W 20	W 21
			I				
2	31.50	9.00	I	2.210	1.860	2.240	2.045
3	66.50	19.00	I	5.505	4.380	5.535	4.925
4	80.50	23.00	I	7.010	5.470	7.060	5.840
5	94.50	27.00	I	9.190	7.160	9.445	6.645
6	108.50	31.00	I	11.865	9.375	12.440	4.910
			I				
7	115.50	33.00	I	14.015	11.235	15.095	5.910

Tabelle A6:

**Durchbiegungen der
Treppe 2 im
Bruchlastzyklus 2.**

oberes Podest:

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	B172	B173	B174	B175	B176	B177	B178	B179	B180
I												
1	21.00	3.00	I	-0.028	-0.017	-0.027	-0.008	-0.105	-0.007	-0.036	-0.005	0.001
2	28.00	4.00	I	-0.037	-0.024	-0.037	-0.010	-0.141	-0.009	-0.049	-0.007	0.002
3	35.00	5.00	I	-0.045	-0.030	-0.045	-0.012	-0.178	-0.010	-0.062	-0.008	0.003
4	42.00	6.00	I	-0.055	-0.036	-0.054	-0.014	-0.214	-0.011	-0.074	-0.009	0.003
5	49.00	7.00	I	-0.065	-0.043	-0.064	-0.017	-0.255	-0.011	-0.089	-0.010	0.004
I												
6	56.00	8.00	I	-0.071	-0.050	-0.072	-0.020	-0.291	-0.014	-0.103	-0.011	0.005
7	56.00	8.00	I	-0.073	-0.054	-0.073	-0.022	-0.294	-0.014	-0.106	-0.008	0.006
8	63.00	9.00	I	-0.074	-0.077	-0.082	-0.029	-0.321	-0.014	-0.119	-0.008	0.006
9	70.00	10.00	I	-0.095	-0.119	-0.071	-0.039	-0.399	-0.014	-0.134	-0.008	0.007
10	77.00	11.00	I	-0.100	-0.140	-0.077	-0.048	-0.440	-0.010	-0.151	-0.007	0.008
I												
11	84.00	12.00	I	-0.098	-0.161	-0.089	-0.058	-0.741	0.011	-0.173	-0.008	0.009
12	84.00	12.00	I	-0.086	-0.177	-0.096	-0.059	-0.783	0.012	-0.195	-0.008	0.010
13	91.00	13.00	I	-0.027	-0.390	-0.109	-0.048	-0.867	0.020	-0.478	0.013	0.014
14	98.00	14.00	I	-0.014	-0.445	-0.135	-0.064	-1.035	0.023	-0.579	—	0.014
15	105.00	15.00	I	-0.086	-0.494	-0.157	-0.077	-1.149	0.033	-0.646	—	0.014
I												
16	112.00	16.00	I	-0.287	-0.630	-0.192	-0.101	-1.251	0.041	-0.688	—	0.014
17	119.00	17.00	I	-0.374	-0.683	-0.249	-0.089	-1.322	0.043	-0.715	—	0.015
18	119.00	17.00	I	-0.422	-0.700	-0.266	-0.081	-1.377	0.044	-0.727	—	0.015
19	126.00	18.00	I	-0.701	-0.620	-0.203	-0.173	-0.928	0.015	-0.392	—	0.023

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	B181	B182	B183	B184	B185	B186	B187	B188	B189
I												
1	21.00	3.00	I	0.002	-0.022	0.014	-0.071	0.003	-0.036	-0.023	-0.055	-0.036
2	28.00	4.00	I	0.002	-0.030	0.017	-0.098	0.003	-0.048	-0.032	-0.077	-0.049
3	35.00	5.00	I	0.003	-0.037	0.022	-0.124	0.006	-0.061	-0.039	-0.098	-0.062
4	42.00	6.00	I	0.003	-0.045	0.026	-0.150	0.006	-0.073	-0.047	-0.118	-0.075
5	49.00	7.00	I	0.004	-0.054	0.031	-0.179	0.008	-0.088	-0.056	-0.141	-0.089
I												
6	56.00	8.00	I	0.005	-0.062	0.033	-0.204	0.007	-0.100	-0.063	-0.157	-0.100
7	56.00	8.00	I	0.006	-0.064	0.028	-0.200	0.004	-0.100	-0.062	-0.145	-0.097
8	63.00	9.00	I	0.009	-0.085	0.027	-0.219	0.005	-0.111	-0.075	-0.160	-0.106
9	70.00	10.00	I	0.011	-0.128	0.027	-0.245	0.005	-0.125	-0.095	-0.171	-0.117
10	77.00	11.00	I	0.013	-0.152	0.025	-0.272	0.008	-0.145	-0.111	-0.186	-0.135
I												
11	84.00	12.00	I	0.015	-0.211	0.024	-0.494	0.008	-0.169	-0.201	-0.438	-0.170
12	84.00	12.00	I	0.018	-0.268	0.027	-0.520	0.009	-0.186	-0.334	-0.458	-0.191
13	91.00	13.00	I	0.017	-0.552	0.030	-0.585	0.012	-0.401	-0.557	-0.513	-0.340
14	98.00	14.00	I	0.017	-0.646	0.035	-0.710	0.017	-0.472	-0.650	-0.619	-0.412
15	105.00	15.00	I	0.022	-0.686	0.041	-0.800	0.047	-0.542	-0.638	-0.663	-0.437
I												
16	112.00	16.00	I	0.042	-0.756	0.050	-0.906	0.053	-0.583	-0.636	-0.733	-0.458
17	119.00	17.00	I	0.049	-0.820	0.056	-0.966	0.055	-0.605	-0.676	-0.768	-0.472
18	119.00	17.00	I	0.049	-0.853	0.057	-1.005	0.055	-0.614	-0.688	-0.790	-0.474
19	126.00	18.00	I	0.083	-0.755	0.064	-0.674	0.032	-0.324	-0.673	-0.482	-0.241

**Tabelle A7: Betonstauchungen des oberen Podestes von Treppe 1
im Bruchlastzyklus 1**

oberes Podest:

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	B172	B173	B174	B175	B176	B177	B178	B179	B180
			I									
2	21.00	3.00	I	-0.013	-0.010	-0.015	-0.004	-0.108	-0.004	-0.039	-0.005	-0.002
3	28.00	4.00	I	-0.018	-0.014	-0.021	-0.006	-0.148	-0.005	-0.054	-0.008	-0.003
4	35.00	5.00	I	-0.023	-0.019	-0.027	-0.008	-0.186	-0.006	-0.067	-0.010	-0.004
5	42.00	6.00	I	-0.028	-0.023	-0.032	-0.009	-0.225	-0.008	-0.082	-0.011	-0.006
6	49.00	7.00	I	-0.033	-0.028	-0.036	-0.011	-0.264	-0.009	-0.097	-0.012	-0.006
			I									
7	56.00	8.00	I	-0.039	-0.030	-0.038	-0.011	-0.263	-0.004	-0.098	-0.011	-0.006
8	63.00	9.00	I	-0.045	-0.034	-0.043	-0.013	-0.300	-0.006	-0.112	-0.012	-0.007
9	70.00	10.00	I	-0.054	-0.043	-0.034	-0.019	-0.418	-0.023	-0.123	-0.012	-0.007
10	77.00	11.00	I	-0.061	-0.050	-0.033	-0.022	-0.482	-0.024	-0.140	-0.013	-0.007
11	84.00	12.00	I	-0.070	-0.056	-0.030	-0.024	-0.487	-0.019	-0.248	-0.030	-0.007
			I									
12	91.00	13.00	I	-0.078	-0.059	-0.030	-0.027	-0.513	-0.031	-0.311	-0.031	-0.008
13	98.00	14.00	I	-0.101	-0.069	-0.055	-0.035	-0.542	-0.032	-0.532	-0.028	-0.007
14	105.00	15.00	I	-0.119	-0.090	-0.100	-0.045	-0.602	-0.032	-0.604	-0.030	-0.005
15	112.00	16.00	I	-0.093	-0.111	-0.144	-0.042	-0.650	-0.041	-0.752	-0.029	-0.003
16	119.00	17.00	I	-0.081	-0.119	-0.166	-0.044	-0.730	-0.053	-0.840	-0.028	0.000
			I									
17	126.00	18.00	I	-0.058	-0.123	-0.195	-0.058	-0.803	-0.101	-0.900	-0.029	0.000

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	B181	B182	B183	B184	B185	B186	B187	B188	B189
			I									
2	21.00	3.00	I	0.003	-0.022	0.013	-0.064	0.004	-0.036	-0.025	-0.048	-0.035
3	28.00	4.00	I	0.003	-0.030	0.018	-0.088	0.005	-0.051	-0.034	-0.066	-0.049
4	35.00	5.00	I	0.003	-0.037	0.022	-0.111	0.006	-0.063	-0.043	-0.083	-0.061
5	42.00	6.00	I	0.003	-0.045	0.026	-0.135	0.007	-0.078	-0.053	-0.100	-0.074
6	49.00	7.00	I	0.002	-0.053	0.029	-0.158	0.007	-0.091	-0.061	-0.120	-0.087
			I									
7	56.00	8.00	I	0.002	-0.056	0.025	-0.161	0.010	-0.100	-0.064	-0.131	-0.095
8	63.00	9.00	I	0.001	-0.065	0.026	-0.183	0.011	-0.115	-0.073	-0.151	-0.109
9	70.00	10.00	I	0.003	-0.078	0.014	-0.509	0.010	-0.129	-0.077	-0.488	-0.116
10	77.00	11.00	I	0.004	-0.093	0.011	-0.628	0.011	-0.156	-0.089	-0.590	-0.134
11	84.00	12.00	I	0.003	-0.108	0.001	-0.642	0.001	-0.167	-0.098	-0.607	-0.123
			I									
12	91.00	13.00	I	0.000	-0.126	-0.004	-0.686	0.000	-0.184	-0.105	-0.625	-0.128
13	98.00	14.00	I	-0.018	-0.214	-0.007	-0.716	0.008	-0.273	-0.118	-0.654	-0.134
14	105.00	15.00	I	-0.065	-0.360	-0.011	-0.763	0.003	-0.329	-0.091	-0.695	-0.149
15	112.00	16.00	I	-0.087	-0.425	-0.013	-0.812	0.000	-0.554	-0.081	-0.744	-0.415
16	119.00	17.00	I	-0.100	-0.456	-0.011	-0.861	0.000	-0.657	-0.066	-0.750	-0.552
			I									
17	126.00	18.00	I	-0.104	-0.480	-0.003	-0.927	0.001	-0.718	-0.071	-0.789	-0.620

**Tabelle A8: Betonstauchungen des oberen Podestes von Treppe 2
im Bruchlastzyklus 1**

unteres Podest:

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	B131	B132	B133	B134	B135	B136	B137	B138	B140
I												
1	21.00	3.00	I	-0.028	-0.032	-0.019	0.004	-0.034	0.003	-0.043	-0.001	-0.005
2	28.00	4.00	I	-0.038	-0.043	-0.026	0.005	-0.046	0.003	-0.058	-0.001	-0.005
3	35.00	5.00	I	-0.048	-0.056	-0.033	0.007	-0.058	0.004	-0.073	-0.002	-0.006
4	42.00	6.00	I	-0.059	-0.070	-0.040	0.008	-0.071	0.005	-0.089	-0.003	-0.009
5	49.00	7.00	I	-0.071	-0.083	-0.047	0.009	-0.084	0.006	-0.105	-0.003	-0.010
I												
6	56.00	8.00	I	-0.080	-0.094	-0.055	0.010	-0.099	0.006	-0.124	-0.004	-0.011
7	56.00	8.00	I	-0.070	-0.083	-0.052	0.008	-0.100	0.001	-0.117	-0.006	-0.008
8	63.00	9.00	I	-0.069	-0.092	-0.064	0.009	-0.111	-0.003	-0.128	-0.006	-0.010
9	70.00	10.00	I	-0.074	-0.072	-0.057	0.010	-0.125	-0.005	-0.136	-0.014	-0.013
10	77.00	11.00	I	-0.089	-0.083	-0.068	0.009	-0.160	-0.007	-0.165	-0.019	-0.013
I												
11	84.00	12.00	I	-0.152	-0.090	-0.083	0.011	-0.487	-0.018	-0.173	-0.027	-0.014
12	84.00	12.00	I	-0.165	-0.091	-0.095	0.019	-0.499	-0.020	-0.175	-0.028	-0.014
13	91.00	13.00	I	-0.188	-0.148	-0.132	0.027	-0.531	-0.023	-0.226	-0.033	-0.020
14	98.00	14.00	I	-0.201	-0.372	-0.169	0.029	-0.557	-0.017	-0.413	-0.050	-0.025
15	105.00	15.00	I	-0.220	-0.471	-0.188	0.037	-0.597	-0.018	-0.507	-0.058	-0.032
I												
16	112.00	16.00	I	-0.254	-0.515	-0.205	0.045	-0.646	-0.047	-0.651	-0.071	-0.046
17	119.00	17.00	I	-0.277	-0.589	-0.184	0.042	-0.675	-0.043	-0.707	-0.035	-0.048
18	119.00	17.00	I	-0.287	-0.631	-0.190	0.041	-0.688	-0.038	-0.732	-0.030	-0.050
19	126.00	18.00	I	-0.296	-0.688	-0.195	0.041	-0.696	-0.034	-0.732	-0.024	-0.075

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	B141	B142	B143	B144	B145	B146	B147	B148
I											
1	21.00	3.00	I	-0.038	-0.005	-0.010	-0.081	0.008	-0.014	-0.014	-0.020
2	28.00	4.00	I	-0.051	-0.007	-0.014	-0.107	0.011	-0.019	-0.019	-0.027
3	35.00	5.00	I	-0.064	-0.008	-0.017	-0.132	0.013	-0.024	-0.024	-0.034
4	42.00	6.00	I	-0.078	-0.009	-0.020	-0.157	0.014	-0.029	-0.030	-0.042
5	49.00	7.00	I	-0.092	-0.010	-0.021	-0.185	0.017	-0.035	-0.035	-0.047
I											
6	56.00	8.00	I	-0.108	-0.009	-0.022	-0.217	0.022	-0.040	-0.039	-0.048
7	56.00	8.00	I	-0.113	-0.002	-0.021	-0.209	0.022	-0.041	-0.039	-0.045
8	63.00	9.00	I	-0.133	0.002	-0.020	-0.223	0.026	-0.050	-0.038	-0.087
9	70.00	10.00	I	-0.151	0.008	-0.018	-0.303	0.051	-0.067	-0.044	-0.117
10	77.00	11.00	I	-0.207	0.043	-0.017	-0.354	0.112	-0.077	-0.048	-0.127
I											
11	84.00	12.00	I	-0.676	—	-0.010	-0.364	0.151	-0.090	-0.055	-0.128
12	84.00	12.00	I	-0.698	—	-0.009	-0.361	0.163	-0.099	-0.062	-0.127
13	91.00	13.00	I	-0.745	—	-0.012	-0.424	0.337	-0.110	-0.070	-0.131
14	98.00	14.00	I	-0.788	—	-0.022	-0.561	—	-0.144	-0.090	-0.121
15	105.00	15.00	I	-0.843	—	-0.036	-0.674	—	-0.163	-0.109	-0.127
I											
16	112.00	16.00	I	-0.902	—	-0.043	-0.941	—	-0.186	-0.134	-0.133
17	119.00	17.00	I	-0.966	—	-0.048	-1.071	—	-0.214	-0.156	-0.132
18	119.00	17.00	I	-0.992	—	-0.052	-1.141	—	-0.219	-0.158	-0.131
19	126.00	18.00	I	-1.015	—	-0.033	-1.196	—	-0.228	-0.181	-0.141

**Tabelle A9: Betonstauchungen des unteren Podestes von
Treppe 1 im Bruchlastzyklus 1**

unteres Podest:

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	B131	B132	B133	B134	B135	B136	B137	B138	B140
			I									
2	21.00	3.00	I	-0.012	-0.017	-0.011	0.003	-0.012	0.000	-0.084	-0.005	-0.017
3	28.00	4.00	I	-0.016	-0.022	-0.013	0.005	-0.016	0.001	-0.113	-0.007	-0.024
4	35.00	5.00	I	-0.019	-0.028	-0.017	0.007	-0.020	0.003	-0.141	-0.009	-0.030
5	42.00	6.00	I	-0.023	-0.034	-0.021	0.009	-0.024	0.006	-0.166	-0.011	-0.036
6	49.00	7.00	I	-0.029	-0.041	-0.026	0.009	-0.030	0.007	-0.193	-0.014	-0.043
			I									
7	56.00	8.00	I	-0.033	-0.049	-0.031	0.011	-0.034	0.009	-0.231	-0.018	-0.049
8	63.00	9.00	I	-0.037	-0.053	-0.034	0.012	-0.038	0.011	-0.256	-0.020	-0.056
9	70.00	10.00	I	-0.043	-0.059	-0.039	0.014	-0.045	0.013	-0.292	-0.025	-0.067
10	77.00	11.00	I	-0.049	-0.060	-0.042	0.015	-0.053	0.014	-0.318	-0.026	-0.079
11	84.00	12.00	I	-0.059	-0.065	-0.053	0.012	-0.063	0.015	-0.349	-0.026	-0.092
			I									
12	91.00	13.00	I	-0.066	-0.060	-0.054	0.011	-0.069	0.014	-0.370	-0.029	-0.109
13	98.00	14.00	I	-0.070	-0.047	-0.056	0.009	-0.076	0.013	-0.380	-0.029	-0.108
14	105.00	15.00	I	-0.076	-0.041	-0.056	0.010	-0.083	0.013	-0.398	-0.029	-0.119
15	112.00	16.00	I	-0.079	-0.025	-0.063	0.010	-0.089	0.014	-0.412	-0.027	-0.136
16	119.00	17.00	I	-0.080	-0.006	-0.063	0.007	-0.093	0.011	-0.408	-0.026	-0.157
			I									
17	126.00	18.00	I	-0.092	-0.006	-0.064	0.007	-0.105	0.011	-0.428	-0.028	-0.277

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	B141	B142	B143	B144	B145	B146	B147	B148
			I								
2	21.00	3.00	I	-0.007	-0.017	-0.032	-0.136	-0.003	-0.013	-0.013	-0.039
3	28.00	4.00	I	-0.010	-0.023	-0.043	-0.187	-0.005	-0.018	-0.018	-0.054
4	35.00	5.00	I	-0.011	-0.030	-0.055	-0.233	-0.007	-0.023	-0.022	-0.067
5	42.00	6.00	I	-0.013	-0.035	-0.066	-0.279	-0.009	-0.029	-0.027	-0.082
6	49.00	7.00	I	-0.016	-0.042	-0.079	-0.329	-0.010	-0.033	-0.032	-0.096
			I								
7	56.00	8.00	I	-0.020	-0.048	-0.101	-0.408	-0.008	-0.041	-0.034	-0.112
8	63.00	9.00	I	-0.023	-0.053	-0.119	-0.462	-0.009	-0.048	-0.039	-0.126
9	70.00	10.00	I	-0.031	-0.057	-0.151	-0.537	-0.009	-0.057	-0.045	-0.144
10	77.00	11.00	I	-0.040	-0.061	-0.173	-0.604	-0.017	-0.071	-0.058	-0.164
11	84.00	12.00	I	-0.053	-0.057	-0.201	-0.645	-0.028	-0.145	-0.064	-0.162
			I								
12	91.00	13.00	I	-0.061	-0.059	-0.222	-0.673	-0.034	-0.170	-0.069	-0.167
13	98.00	14.00	I	-0.067	-0.058	0.465	-0.636	-0.055	-0.194	-0.075	-0.166
14	105.00	15.00	I	-0.076	-0.061	0.702	-0.656	-0.069	-0.213	-0.083	-0.148
15	112.00	16.00	I	-0.082	-0.066	1.022	-0.655	-0.097	-0.229	-0.090	-0.004
16	119.00	17.00	I	-0.092	-0.071	—	-0.666	-0.115	-0.243	-0.099	0.009
			I								
17	126.00	18.00	I	-0.126	-0.093	—	-0.666	-0.137	-0.254	-0.111	0.021

Tabelle A10: Betonstauchungen des unteren Podestes von
Treppe 2 im Bruchlastzyklus 1

Treppe 1

oberer Lauf :

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	B149	B150	B151	B152	B153	B154	B155	B156	B157	B158	B159	B160	B161
I																
1	21.00	3.00	I	0.014	0.007	-0.005	-0.025	-0.040	-0.032	-0.040	-0.039	-0.010	-0.016	-0.008	-0.030	0.005
2	28.00	4.00	I	0.018	0.010	-0.007	-0.035	-0.053	-0.043	-0.054	-0.052	-0.013	-0.022	-0.011	-0.040	0.007
3	35.00	5.00	I	0.023	0.013	-0.007	-0.044	-0.067	-0.054	-0.068	-0.066	-0.016	-0.029	-0.013	-0.050	0.009
4	42.00	6.00	I	0.029	0.014	-0.007	-0.054	-0.081	-0.066	-0.083	-0.079	-0.020	-0.036	-0.016	-0.061	0.011
5	49.00	7.00	I	0.034	0.018	-0.005	-0.064	-0.096	-0.077	-0.099	-0.094	-0.024	-0.043	-0.016	-0.071	0.014
I																
6	56.00	8.00	I	0.039	0.021	-0.005	-0.074	-0.113	-0.090	-0.116	-0.111	-0.030	-0.050	-0.009	-0.080	0.015
7	56.00	8.00	I	0.042	0.021	-0.005	-0.078	-0.121	-0.095	-0.124	-0.118	-0.032	-0.054	0.009	-0.082	0.012
8	63.00	9.00	I	0.045	0.025	-0.003	-0.094	-0.146	-0.111	-0.152	-0.142	-0.053	-0.070	0.116	-0.101	0.005
9	70.00	10.00	I	0.051	0.028	-0.003	-0.106	-0.171	-0.128	-0.183	-0.166	-0.066	-0.084	—	-0.108	0.007
10	77.00	11.00	I	0.061	0.032	-0.005	-0.122	-0.202	-0.147	-0.220	-0.197	-0.071	-0.101	—	-0.121	0.006
I																
11	84.00	12.00	I	0.070	0.033	-0.003	-0.134	-0.231	-0.166	-0.275	-0.228	-0.071	-0.120	—	-0.138	0.004
12	84.00	12.00	I	0.072	0.034	0.001	-0.137	-0.241	-0.174	-0.297	-0.238	-0.068	-0.126	—	-0.153	0.008
13	91.00	13.00	I	0.076	0.040	0.003	-0.151	-0.267	-0.190	-0.329	-0.265	-0.064	-0.143	—	-0.144	0.019
14	98.00	14.00	I	0.086	0.043	0.013	-0.177	-0.306	-0.219	-0.380	-0.303	-0.071	-0.160	—	-0.163	0.028
15	105.00	15.00	I	0.093	0.046	0.016	-0.215	-0.342	-0.240	-0.428	-0.327	-0.066	-0.186	—	-0.182	-0.008
I																
16	112.00	16.00	I	0.113	0.059	0.028	-0.369	-0.478	-0.352	-0.522	-0.452	-0.074	-0.246	—	-0.220	-0.043
17	119.00	17.00	I	0.129	0.062	0.037	-0.409	-0.508	-0.383	-0.548	-0.479	-0.056	-0.287	—	-0.327	-0.039
18	119.00	17.00	I	0.138	0.060	0.038	-0.422	-0.521	-0.398	-0.559	-0.487	-0.056	-0.305	—	-0.349	-0.038
19	126.00	18.00	I	0.112	0.079	0.088	-0.477	-0.628	-0.511	-0.643	-0.586	-0.262	-0.400	—	-0.249	-0.034

Treppe 2

oberer Lauf :

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	B149	B150	B151	B152	B153	B154	B155	B156	B157	B158	B159	B160	B161
I																
2	21.00	3.00	I	-0.020	-0.025	-0.036	-0.011	-0.025	-0.015	-0.022	-0.027	0.000	-0.017	0.017	-0.014	0.002
3	28.00	4.00	I	-0.029	-0.033	-0.051	-0.015	-0.033	-0.020	-0.030	-0.036	0.000	-0.023	0.025	-0.018	0.004
4	35.00	5.00	I	-0.036	-0.043	-0.063	-0.019	-0.042	-0.026	-0.037	-0.046	0.000	-0.028	0.033	-0.021	0.007
5	42.00	6.00	I	-0.045	-0.052	-0.078	-0.023	-0.051	-0.032	-0.045	-0.056	0.000	-0.033	0.041	-0.025	0.010
6	49.00	7.00	I	-0.054	-0.062	-0.092	-0.028	-0.060	-0.037	-0.054	-0.066	0.000	-0.040	0.049	-0.030	0.009
I																
7	56.00	8.00	I	-0.064	-0.077	-0.113	-0.030	-0.070	-0.045	-0.061	-0.078	0.000	-0.047	0.075	-0.031	0.002
8	63.00	9.00	I	-0.076	-0.088	-0.129	-0.033	-0.080	-0.052	-0.070	-0.090	0.000	-0.056	0.096	-0.036	-0.002
9	70.00	10.00	I	-0.092	-0.109	-0.160	-0.036	-0.093	-0.062	-0.079	-0.104	0.000	-0.064	0.102	-0.030	-0.019
10	77.00	11.00	I	-0.108	-0.127	-0.185	-0.043	-0.109	-0.074	-0.094	-0.124	0.000	-0.075	0.112	-0.035	-0.028
11	84.00	12.00	I	-0.124	-0.144	-0.222	-0.055	-0.134	-0.090	-0.115	-0.152	0.000	-0.087	0.170	-0.040	-0.041
I																
12	91.00	13.00	I	-0.139	-0.162	-0.264	-0.061	-0.158	-0.105	-0.133	-0.179	0.000	-0.099	0.230	-0.046	-0.054
13	98.00	14.00	I	-0.117	-0.175	-0.313	-0.072	-0.201	-0.126	-0.169	-0.230	0.000	-0.110	0.421	-0.067	-0.067
14	105.00	15.00	I	-0.129	-0.188	-0.337	-0.078	-0.226	-0.139	-0.189	-0.258	0.000	-0.117	0.569	-0.097	-0.077
15	112.00	16.00	I	-0.147	-0.205	-0.345	-0.084	-0.243	-0.148	-0.198	-0.283	0.000	-0.144	—	-0.134	-0.086
16	119.00	17.00	I	-0.163	-0.219	-0.356	-0.094	-0.271	-0.162	-0.220	-0.316	0.000	-0.156	—	-0.152	-0.097
I																
17	126.00	18.00	I	-0.153	-0.229	-0.355	-0.100	-0.330	-0.179	-0.257	-0.405	0.000	-0.161	—	-0.180	-0.113

Tabelle A11: Betonstauchungen des oberen Laufs für beide Versuchskörper

Treppe 1

unterer Lauf :

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	B162	B163	B164	B165	B166	B167	B168	B169	B170	B171
1	21.00	3.00	I	-0.004	-0.014	-0.003	-0.017	-0.037	-0.008	-0.043	-0.030	-0.042	-0.028
2	28.00	4.00	I	-0.006	-0.019	-0.004	-0.023	-0.048	-0.011	-0.057	-0.041	-0.056	-0.037
3	35.00	5.00	I	-0.008	-0.025	-0.005	-0.028	-0.060	-0.013	-0.071	-0.050	-0.071	-0.045
4	42.00	6.00	I	-0.010	-0.031	-0.008	-0.034	-0.073	-0.014	-0.086	-0.061	-0.084	-0.055
5	49.00	7.00	I	-0.011	-0.037	-0.009	-0.040	-0.087	-0.016	-0.102	-0.072	-0.101	-0.066
6	56.00	8.00	I	-0.011	-0.041	-0.011	-0.049	-0.103	-0.022	-0.123	-0.087	-0.121	-0.077
7	56.00	8.00	I	-0.016	-0.039	-0.010	-0.052	-0.109	-0.024	-0.131	-0.091	-0.129	-0.080
8	63.00	9.00	I	-0.018	-0.038	0.000	-0.065	-0.127	-0.028	-0.154	-0.105	-0.150	-0.091
9	70.00	10.00	I	-0.025	-0.048	0.021	-0.076	-0.149	-0.031	-0.179	-0.122	-0.173	-0.102
10	77.00	11.00	I	-0.024	-0.053	0.034	-0.095	-0.176	-0.037	-0.215	-0.142	-0.203	-0.118
11	84.00	12.00	I	-0.022	-0.057	0.045	-0.113	-0.209	-0.048	-0.265	-0.157	-0.236	-0.131
12	84.00	12.00	I	-----	-0.071	0.044	-0.114	-0.222	-0.050	-0.283	-0.159	-0.246	-0.136
13	91.00	13.00	I	-----	-0.082	0.043	-0.129	-0.252	-0.058	-0.327	-0.175	-0.270	-0.149
14	98.00	14.00	I	-----	-0.109	0.027	-0.133	-0.287	-0.069	-0.384	-0.188	-0.308	-0.169
15	105.00	15.00	I	-----	-0.130	0.014	-0.137	-0.346	-0.067	-0.473	-0.188	-0.348	-0.205
16	112.00	16.00	I	-----	-0.168	-0.012	-0.127	-0.441	-0.073	-0.554	-0.197	-0.394	-0.256
17	119.00	17.00	I	-----	-0.200	-0.067	-0.124	-0.478	-0.077	-0.600	-0.210	-0.452	-0.266
18	119.00	17.00	I	-----	-0.215	-0.085	-0.116	-0.488	-0.080	-0.614	-0.214	-0.479	-0.268
19	126.00	18.00	I	-----	-0.255	-0.100	-0.098	-0.513	-0.078	-0.641	-0.228	-0.500	-0.290

Treppe 2

unterer Lauf :

Betonstauchungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	B162	B163	B164	B165	B166	B167	B168	B169	B170	B171
2	21.00	3.00	I	-0.016	-0.013	0.011	-0.014	-0.033	-0.005	-0.033	-0.026	-0.051	-0.032
3	28.00	4.00	I	-0.022	-0.017	0.018	-0.018	-0.043	-0.007	-0.048	-0.036	-0.072	-0.044
4	35.00	5.00	I	-0.026	-0.020	0.024	-0.022	-0.053	-0.009	-0.060	-0.046	-0.090	-0.056
5	42.00	6.00	I	-0.032	-0.023	0.031	-0.026	-0.063	-0.011	-0.073	-0.056	-0.109	-0.067
6	49.00	7.00	I	-0.038	-0.029	0.035	-0.032	-0.077	-0.012	-0.087	-0.066	-0.130	-0.080
7	56.00	8.00	I	-0.044	-0.030	0.049	-0.039	-0.091	-0.017	-0.106	-0.080	-0.159	-0.098
8	63.00	9.00	I	-0.053	-0.036	0.057	-0.046	-0.106	-0.019	-0.122	-0.093	-0.184	-0.115
9	70.00	10.00	I	-0.062	-0.042	0.072	-0.055	-0.123	-0.022	-0.146	-0.111	-0.218	-0.145
10	77.00	11.00	I	-0.078	-0.055	0.090	-0.059	-0.138	-0.016	-0.171	-0.119	-0.259	-0.183
11	84.00	12.00	I	-0.101	-0.051	0.026	-0.062	-0.144	-0.023	-0.192	-0.116	-0.336	-0.260
12	91.00	13.00	I	-0.120	-0.053	0.030	-0.064	-0.156	-0.021	-0.212	-0.123	-0.396	-0.294
13	98.00	14.00	I	-0.153	-0.061	0.256	-0.057	-0.168	-0.016	-0.274	-0.130	-0.496	-0.306
14	105.00	15.00	I	-0.180	-0.073	0.358	-0.056	-0.179	-0.017	-0.321	-0.141	-0.570	-0.329
15	112.00	16.00	I	-0.218	-0.085	0.487	-0.053	-0.171	-0.014	-0.442	-0.140	-0.664	-0.337
16	119.00	17.00	I	-0.252	-0.100	0.568	-0.053	-0.179	-0.012	-0.508	-0.146	-0.744	-0.353
17	126.00	18.00	I	-0.291	-0.116	0.634	-0.048	-0.164	-0.006	-0.583	-0.137	-0.789	-0.361

Tabelle A12: Betonstauchungen des unteren Laufs für beide Versuchskörper

unteres Podest:

Betonstauchungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	B131	B132	B133	B134	B135	B136	B137	B138	B140
			I									
1	31.50	9.00	I	-0.044	-0.014	-0.022	-0.006	-0.106	-0.015	-0.055	0.009	0.007
2	52.50	15.00	I	-0.075	0.003	-0.034	-0.012	-0.186	-0.036	-0.091	0.007	0.021
3	66.50	19.00	I	-0.097	0.014	-0.042	-0.017	-0.239	-0.051	-0.119	0.003	0.043
4	73.50	21.00	I	-0.110	0.007	-0.047	-0.020	-0.269	-0.060	-0.139	0.000	0.064
5	80.50	23.00	I	-0.122	-0.010	-0.054	-0.024	-0.297	-0.069	-0.161	-0.001	0.078
			I									
6	87.50	25.00	I	-0.134	-0.027	-0.069	-0.030	-0.326	-0.078	-0.186	0.005	0.103
7	94.50	27.00	I	-0.146	-0.050	-0.060	-0.041	-0.355	-0.080	-0.214	0.034	0.149
8	101.50	29.00	I	-0.160	-0.073	-0.064	-0.059	-0.381	-0.089	-0.241	0.037	0.356
9	108.50	31.00	I	-0.195	-0.124	-0.083	-0.132	-0.430	-0.098	-0.279	0.004	—

Betonstauchungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

SEITE 2

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	B141	B142	B143	B144	B145	B146	B147	B148
			I								
1	31.50	9.00	I	-0.183	0.000	0.009	-0.115	0.000	-0.072	-0.086	-0.064
2	52.50	15.00	I	-0.323	0.000	0.019	-0.184	0.000	-0.120	-0.142	-0.103
3	66.50	19.00	I	-0.412	0.000	0.027	-0.234	0.000	-0.150	-0.171	-0.129
4	73.50	21.00	I	-0.459	0.000	0.031	-0.267	0.000	-0.177	-0.193	-0.124
5	80.50	23.00	I	-0.505	0.000	0.035	-0.301	0.000	-0.202	-0.218	-0.126
			I								
6	87.50	25.00	I	-0.554	0.000	0.037	-0.338	0.000	-0.240	-0.252	-0.122
7	94.50	27.00	I	-0.611	0.000	0.038	-0.378	0.000	-0.254	-0.283	-0.238
8	101.50	29.00	I	-0.679	0.000	0.041	-0.419	0.000	-0.275	-0.314	-0.317
9	108.50	31.00	I	-0.748	0.000	0.038	-0.468	0.000	-0.271	-0.324	-0.353

unterer Lauf :

Betonstauchungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	B162	B163	B164	B165	B166	B167	B168	B169	B170	B171
			I										
1	31.50	9.00	I	0.000	-0.111	-0.026	0.003	-0.125	0.012	-0.155	-0.072	-0.147	-0.103
2	52.50	15.00	I	0.000	-0.169	-0.056	-0.013	-0.216	0.021	-0.279	-0.123	-0.254	-0.169
3	66.50	19.00	I	0.000	-0.185	-0.076	-0.032	-0.289	0.023	-0.373	-0.166	-0.333	-0.222
4	73.50	21.00	I	0.000	-0.189	-0.089	-0.043	-0.330	0.017	-0.426	-0.192	-0.378	-0.252
5	80.50	23.00	I	0.000	-0.195	-0.102	-0.053	-0.370	0.012	-0.477	-0.217	-0.423	-0.281
			I										
6	87.50	25.00	I	0.000	-0.190	-0.106	-0.069	-0.419	-0.002	-0.537	-0.252	-0.475	-0.314
7	94.50	27.00	I	0.000	-0.193	-0.116	-0.080	-0.473	-0.007	-0.601	-0.290	-0.534	-0.350
8	101.50	29.00	I	0.000	-0.201	-0.115	-0.094	-0.540	-0.014	-0.676	-0.334	-0.606	-0.391
9	108.50	31.00	I	0.000	-0.212	-0.083	-0.103	-0.599	-0.020	-0.745	-0.377	-0.672	-0.431

Tabelle A13: Betonstauchungen für Treppe 1 im Bruchlastzyklus 2

unteres Podest:

Betonstauchungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	B131	B132	B133	B134	B135	B136	B137	B138	B140
			I									
2	31.50	9.00	I	-0.026	-0.017	-0.027	-0.029	-0.036	0.005	-0.121	-0.002	-0.024
3	66.50	19.00	I	-0.052	-0.036	-0.064	-0.064	-0.087	-0.013	-0.270	-0.040	-0.071
4	80.50	23.00	I	-0.066	-0.048	-0.080	-0.088	-0.120	-0.019	-0.335	-0.058	-0.096
5	94.50	27.00	I	-0.085	-0.057	-0.089	-0.137	-0.179	-0.021	-0.402	-0.071	-0.126
6	108.50	31.00	I	-0.101	-0.080	-0.086	-0.225	-0.364	-0.033	-0.458	-0.093	-0.188
			I									
7	115.50	33.00	I	-0.113	-0.088	-0.072	-0.231	-0.433	-0.032	-0.494	-0.089	-0.201

Betonstauchungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	B141	B142	B143	B144	B145	B146	B147	B148
			I								
2	31.50	9.00	I	-0.015	0.018	0.022	-0.181	-0.099	-0.072	-0.098	-0.078
3	66.50	19.00	I	-0.041	0.039	-0.092	-0.389	-0.173	-0.120	-0.122	-0.154
4	80.50	23.00	I	-0.055	0.047	-0.134	-0.490	-0.236	-0.159	-0.181	-0.171
5	94.50	27.00	I	-0.069	0.049	-0.155	-0.610	-0.334	-0.205	-0.297	-0.192
6	108.50	31.00	I	-0.083	0.024	-0.124	-0.714	-0.504	-0.268	-0.587	-0.184
			I								
7	115.50	33.00	I	-0.088	0.019	-0.105	-0.778	-0.614	-0.301	-0.727	-0.197

unterer Lauf :

Betonstauchungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	B162	B163	B164	B165	B166	B167	B168	B169	B170	B171
			I										
2	31.50	9.00	I	-0.102	-0.094	0.087	0.010	-0.060	0.013	-0.199	-0.053	-0.225	-0.159
3	66.50	19.00	I	-0.172	-0.127	0.156	-0.020	-0.163	0.004	-0.501	-0.168	-0.555	-0.394
4	80.50	23.00	I	-0.241	-0.156	0.211	-0.021	-0.204	0.006	-0.615	-0.216	-0.744	-0.483
5	94.50	27.00	I	-0.336	-0.199	0.283	-0.017	-0.274	0.011	-0.740	-0.347	-1.031	-0.608
6	108.50	31.00	I	-0.433	-0.246	0.430	-0.017	-0.357	0.014	-0.900	-0.498	-1.300	-0.811
			I										
7	115.50	33.00	I	-0.499	-0.292	0.488	-0.010	-0.398	0.022	-0.974	-0.551	-1.747	-1.054

Tabelle A14: Betonstauchungen für Treppe 2 im Bruchlastzyklus 2

oberes Podest:

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 72	S 73	S 74	S 75	S 76	S 77	S 78	S 79	S 80
<hr/>												
1	21.00	3.00	I	0.042	0.007	0.002	0.023	0.210	0.007	0.026	0.004	0.000
2	28.00	4.00	I	0.058	0.010	0.002	0.031	0.270	0.007	0.035	0.004	-0.002
3	35.00	5.00	I	0.074	0.014	0.004	0.042	0.319	0.010	0.045	0.005	-0.002
4	42.00	6.00	I	0.088	0.015	0.003	0.050	0.366	0.013	0.057	0.007	-0.001
5	49.00	7.00	I	0.110	0.020	0.005	0.060	0.427	0.015	0.067	0.008	-0.002
<hr/>												
6	56.00	8.00	I	0.144	0.025	0.006	0.067	0.495	0.020	0.078	0.008	-0.003
7	56.00	8.00	I	0.184	0.032	0.008	0.066	0.523	0.022	0.077	0.006	-0.004
8	63.00	9.00	I	0.172	0.047	0.009	0.072	0.559	0.026	0.087	0.007	-0.004
9	70.00	10.00	I	0.371	0.096	0.008	0.083	0.733	0.029	0.100	0.008	-0.004
10	77.00	11.00	I	0.526	0.118	0.009	0.109	0.885	0.030	0.125	0.008	-0.002
<hr/>												
11	84.00	12.00	I	0.680	0.136	0.011	0.132	1.946	0.029	0.149	0.012	-0.002
12	84.00	12.00	I	0.821	0.157	0.018	0.163	2.043	0.031	0.188	0.016	-0.002
13	91.00	13.00	I	1.298	0.580	0.040	0.203	2.280	0.037	1.617	0.028	0.002
14	98.00	14.00	I	1.548	0.755	0.033	0.281	2.790	0.042	1.938	0.031	0.000
15	105.00	15.00	I	2.061	0.925	0.044	0.459	3.432	0.045	2.541	0.036	0.000
<hr/>												
16	112.00	16.00	I	2.736	1.447	0.086	0.965	4.384	0.053	2.798	0.034	0.000
17	119.00	17.00	I	3.010	1.652	0.141	0.970	4.888	0.061	2.916	0.033	0.000
18	119.00	17.00	I	3.148	1.759	0.210	0.972	5.290	0.070	2.974	0.033	0.001
19	126.00	18.00	I	3.278	2.271	0.330	1.006	4.015	0.074	1.861	0.018	-0.007

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 81	S 82	S 83	S 84	S 85	S 86	S 87	S 88	S 89
<hr/>												
1	21.00	3.00	I	-0.007	0.017	0.001	—	0.000	0.022	0.024	0.119	0.029
2	28.00	4.00	I	-0.010	0.021	0.002	—	-0.001	0.030	0.031	0.160	0.038
3	35.00	5.00	I	-0.013	0.028	0.003	—	-0.002	0.038	0.038	0.197	0.048
4	42.00	6.00	I	-0.014	0.036	0.006	—	-0.004	0.045	0.045	0.233	0.058
5	49.00	7.00	I	-0.018	0.043	0.007	—	-0.003	0.056	0.055	0.285	0.071
<hr/>												
6	56.00	8.00	I	-0.020	0.050	0.008	—	0.000	0.065	0.063	0.349	0.083
7	56.00	8.00	I	-0.021	0.050	0.011	—	0.001	0.067	0.063	0.356	0.082
8	63.00	9.00	I	-0.023	0.067	0.015	—	0.001	0.075	0.075	0.389	0.091
9	70.00	10.00	I	-0.024	0.127	0.016	—	0.003	0.091	0.098	0.449	0.107
10	77.00	11.00	I	-0.028	0.200	0.020	—	0.008	0.236	0.124	0.551	0.155
<hr/>												
11	84.00	12.00	I	-0.035	0.204	0.019	—	0.005	0.357	0.322	1.879	0.392
12	84.00	12.00	I	-0.039	0.471	0.018	—	0.000	0.483	0.617	1.969	0.519
13	91.00	13.00	I	-0.026	1.245	0.027	—	-0.029	1.620	1.654	2.240	1.844
14	98.00	14.00	I	-0.030	1.733	0.024	—	-0.052	1.883	1.912	2.707	2.130
15	105.00	15.00	I	-0.028	1.996	0.023	—	-0.061	2.314	1.939	3.050	2.639
<hr/>												
16	112.00	16.00	I	-0.044	2.069	0.018	—	-0.050	2.544	2.053	3.962	2.863
17	119.00	17.00	I	-0.055	4.066	0.017	—	-0.044	2.650	2.253	4.900	2.976
18	119.00	17.00	I	-0.054	—	0.023	—	-0.040	2.702	2.356	5.590	3.028
19	126.00	18.00	I	-0.061	2.038	-0.033	—	-0.014	1.753	2.105	4.416	1.855

**Tabelle A15: Stahldehnungen des oberen Podestes von Treppe 1
im Bruchlastzyklus 1**

oberes Podest:

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 72	S 73	S 74	S 75	S 76	S 77	S 78	S 79	S 80
I												
2	21.00	3.00	I	0.031	0.006	0.001	0.010	0.368	0.006	0.020	0.004	0.002
3	28.00	4.00	I	0.041	0.008	-0.001	0.013	0.500	0.008	0.030	0.005	0.003
4	35.00	5.00	I	0.052	0.010	0.000	0.017	0.614	0.011	0.039	0.007	0.004
5	42.00	6.00	I	0.063	0.013	0.000	0.021	0.707	0.014	0.049	0.009	0.006
6	49.00	7.00	I	0.075	0.016	0.000	0.024	0.807	0.017	0.059	0.011	0.008
I												
7	56.00	8.00	I	0.089	0.018	0.001	0.023	0.829	0.013	0.060	0.011	0.009
8	63.00	9.00	I	0.101	0.022	0.002	0.026	0.883	0.016	0.070	0.013	0.011
9	70.00	10.00	I	0.101	0.036	-0.003	0.026	1.161	0.027	0.077	0.012	0.011
10	77.00	11.00	I	0.119	0.048	-0.006	0.027	1.307	0.030	0.092	0.015	0.013
11	84.00	12.00	I	0.152	0.053	-0.005	0.024	1.300	0.025	0.552	0.047	0.016
I												
12	91.00	13.00	I	0.201	0.064	0.005	0.032	1.505	0.041	0.735	0.053	0.019
13	98.00	14.00	I	0.343	0.070	0.014	0.040	1.699	0.047	1.635	0.053	0.020
14	105.00	15.00	I	0.535	0.082	0.026	0.052	1.853	0.053	1.869	0.057	0.020
15	112.00	16.00	I	0.788	0.098	0.042	0.063	2.010	0.061	2.411	0.060	0.020
16	119.00	17.00	I	0.905	0.108	0.046	0.073	2.178	0.065	2.706	0.063	0.020
I												
17	126.00	18.00	I	1.043	0.111	0.057	0.082	2.439	0.068	2.876	0.064	0.020

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 81	S 82	S 83	S 84	S 85	S 86	S 87	S 88	S 89
I												
2	21.00	3.00	I	-0.006	0.017	-0.012	0.000	-0.002	0.034	0.020	0.050	0.029
3	28.00	4.00	I	-0.007	0.024	-0.016	0.000	-0.001	0.049	0.027	0.071	0.043
4	35.00	5.00	I	-0.008	0.029	-0.019	0.000	-0.001	0.062	0.034	0.090	0.055
5	42.00	6.00	I	-0.009	0.035	-0.021	0.000	-0.001	0.074	0.041	0.109	0.065
6	49.00	7.00	I	-0.010	0.043	-0.023	0.000	-0.001	0.089	0.048	0.137	0.078
I												
7	56.00	8.00	I	-0.009	0.047	-0.019	0.000	-0.002	0.097	0.052	0.170	0.093
8	63.00	9.00	I	-0.010	0.055	-0.019	0.000	-0.003	0.114	0.058	0.215	0.109
9	70.00	10.00	I	-0.009	0.069	0.019	0.000	-0.002	0.136	0.062	1.729	0.127
10	77.00	11.00	I	-0.010	0.096	0.023	0.000	-0.004	0.179	0.074	2.104	0.176
11	84.00	12.00	I	-0.004	0.126	0.034	0.000	-0.009	0.860	0.081	2.192	1.106
I												
12	91.00	13.00	I	0.008	0.175	0.058	0.000	-0.013	0.973	0.088	2.273	1.242
13	98.00	14.00	I	0.095	0.520	0.053	0.000	0.013	1.659	0.109	2.421	1.497
14	105.00	15.00	I	0.245	1.172	0.044	0.000	0.001	1.841	0.266	2.581	1.652
15	112.00	16.00	I	0.332	1.501	0.043	0.000	-0.120	2.587	0.448	2.853	2.609
16	119.00	17.00	I	0.380	1.666	0.038	0.000	-0.129	2.941	0.526	3.051	3.199
I												
17	126.00	18.00	I	0.416	1.743	0.019	0.000	-0.124	3.138	0.538	3.149	3.473

Tabelle A16: Stahldehnungen des oberen Podestes von Treppe 2
im Bruchlastzyklus 1

unteres Podest:

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 31	S 32	S 33	S 34	S 35	S 36	S 37	S 38	S 40
I												
1	21.00	3.00	I	—	0.039	0.020	-0.005	0.027	-0.009	0.034	-0.003	0.010
2	28.00	4.00	I	—	0.055	0.026	-0.006	0.036	-0.012	0.047	-0.005	0.010
3	35.00	5.00	I	—	0.069	0.033	-0.007	0.047	-0.014	0.059	-0.006	0.014
4	42.00	6.00	I	—	0.085	0.040	-0.009	0.057	-0.016	0.071	-0.008	0.015
5	49.00	7.00	I	—	0.102	0.047	-0.010	0.069	-0.017	0.086	-0.009	0.018
I												
6	56.00	8.00	I	—	0.119	0.055	-0.010	0.086	-0.017	0.104	-0.009	0.020
7	56.00	8.00	I	—	0.118	0.053	-0.008	0.091	-0.016	0.116	-0.008	0.020
8	63.00	9.00	I	—	0.129	0.061	-0.011	0.107	-0.013	0.130	-0.008	0.021
9	70.00	10.00	I	—	0.120	0.057	-0.015	0.127	-0.006	0.135	-0.005	0.024
10	77.00	11.00	I	—	0.147	0.069	-0.015	0.221	-0.002	0.180	0.003	0.028
I												
11	84.00	12.00	I	—	0.162	0.078	-0.027	1.540	0.005	0.196	0.010	0.027
12	84.00	12.00	I	—	0.183	0.090	-0.023	1.670	0.004	0.225	0.015	0.033
13	91.00	13.00	I	—	0.315	0.129	-0.022	1.859	-0.009	0.276	0.019	0.042
14	98.00	14.00	I	—	1.576	0.631	-0.015	2.005	-0.115	0.857	0.058	0.043
15	105.00	15.00	I	—	1.975	0.734	-0.011	2.152	-0.126	1.247	0.068	0.048
I												
16	112.00	16.00	I	—	2.277	0.939	-0.008	2.404	-0.156	1.722	0.095	0.060
17	119.00	17.00	I	—	2.602	1.016	0.007	2.600	-0.176	2.073	0.176	0.061
18	119.00	17.00	I	—	2.796	1.038	0.013	2.716	-0.187	2.295	0.194	0.061
19	126.00	18.00	I	—	3.034	1.073	0.018	2.907	-0.184	2.615	0.205	0.078

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 41	S 42	S 43	S 44	S 45	S 46	S 47	S 48
I											
1	21.00	3.00	I	0.025	0.003	0.005	0.098	-0.002	0.005	0.004	0.029
2	28.00	4.00	I	0.033	0.002	0.004	0.129	-0.004	0.005	0.003	0.037
3	35.00	5.00	I	0.044	0.004	0.006	0.160	-0.004	0.007	0.004	0.047
4	42.00	6.00	I	0.053	0.003	0.006	0.189	-0.005	0.007	0.003	0.055
5	49.00	7.00	I	0.064	0.004	0.007	0.230	-0.005	0.010	0.005	0.066
I											
6	56.00	8.00	I	0.080	0.005	0.009	0.289	-0.006	0.014	0.005	0.072
7	56.00	8.00	I	0.087	0.004	0.012	0.292	-0.011	0.015	0.003	0.070
8	63.00	9.00	I	0.110	0.003	0.011	0.318	-0.018	0.022	-0.003	0.085
9	70.00	10.00	I	0.133	0.001	0.007	0.503	-0.006	0.035	-0.011	0.133
10	77.00	11.00	I	0.268	0.003	0.013	0.709	-0.010	0.045	-0.014	0.252
I											
11	84.00	12.00	I	2.135	0.008	0.010	0.769	-0.022	0.050	-0.015	0.363
12	84.00	12.00	I	2.213	0.017	0.011	0.790	-0.021	0.056	-0.010	0.508
13	91.00	13.00	I	2.436	0.027	0.012	1.070	-0.027	0.062	-0.010	0.578
14	98.00	14.00	I	2.605	0.030	0.016	1.685	-0.022	0.079	0.001	0.816
15	105.00	15.00	I	2.872	0.029	0.027	2.130	-0.021	0.095	0.006	0.907
I											
16	112.00	16.00	I	3.203	0.035	0.042	2.835	0.009	0.116	0.020	1.152
17	119.00	17.00	I	3.553	0.038	0.052	3.212	0.019	0.145	0.030	1.341
18	119.00	17.00	I	3.720	0.041	0.061	3.432	0.027	0.169	0.034	1.445
19	126.00	18.00	I	4.098	0.048	0.069	4.061	0.079	0.191	0.045	1.556

Tabelle A17: Stahldehnungen des unteren Podestes von Treppe 1
im Bruchlastzyklus 1

unteres Podest:

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 31	S 32	S 33	S 34	S 35	S 36	S 37	S 38	S 40
I												
2	21.00	3.00	I	0.010	0.273	0.020	0.002	0.013	-0.018	0.177	0.008	0.014
3	28.00	4.00	I	0.015	0.377	0.029	0.003	0.019	-0.020	0.254	0.013	0.020
4	35.00	5.00	I	0.019	0.471	0.038	0.004	0.023	-0.022	0.319	0.018	0.026
5	42.00	6.00	I	0.023	0.549	0.047	0.005	0.029	-0.025	0.375	0.020	0.031
6	49.00	7.00	I	0.028	0.628	0.058	0.006	0.036	-0.028	0.437	0.025	0.037
I												
7	56.00	8.00	I	0.034	0.747	0.074	0.006	0.044	-0.031	0.537	0.034	0.045
8	63.00	9.00	I	0.041	0.827	0.090	0.008	0.052	-0.033	0.605	0.040	0.051
9	70.00	10.00	I	0.048	0.947	0.109	0.007	0.062	-0.036	0.730	0.049	0.061
10	77.00	11.00	I	0.056	1.044	0.137	0.008	0.075	-0.041	0.846	0.049	0.079
11	84.00	12.00	I	0.066	1.180	0.177	0.012	0.094	-0.040	1.020	0.049	0.096
I												
12	91.00	13.00	I	0.074	1.294	0.214	0.015	0.101	-0.041	1.138	0.049	0.125
13	98.00	14.00	I	0.084	1.437	0.241	0.023	0.110	-0.038	1.204	0.050	0.162
14	105.00	15.00	I	0.094	1.543	0.276	0.025	0.122	-0.038	1.326	0.049	0.190
15	112.00	16.00	I	0.102	1.674	0.315	0.027	0.130	-0.043	1.473	0.049	0.240
16	119.00	17.00	I	0.104	1.689	0.354	0.032	0.139	-0.048	1.579	0.043	0.297
I												
17	126.00	18.00	I	0.118	1.799	0.381	0.033	0.156	-0.045	1.713	0.045	1.015

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 41	S 42	S 43	S 44	S 45	S 46	S 47	S 48
I											
2	21.00	3.00	I	0.008	0.019	0.000	0.199	-0.007	0.004	0.005	0.038
3	28.00	4.00	I	0.012	0.026	0.000	0.301	-0.010	0.006	0.007	0.054
4	35.00	5.00	I	0.016	0.035	0.000	0.401	-0.010	0.009	0.010	0.068
5	42.00	6.00	I	0.019	0.043	0.000	0.492	-0.013	0.010	0.010	0.082
6	49.00	7.00	I	0.021	0.051	0.000	0.581	-0.015	0.012	0.010	0.097
I											
7	56.00	8.00	I	0.026	0.059	0.000	0.734	-0.022	0.014	0.011	0.114
8	63.00	9.00	I	0.027	0.062	0.000	0.834	-0.026	0.014	0.011	0.130
9	70.00	10.00	I	0.030	0.068	0.000	1.013	-0.034	0.016	0.012	0.154
10	77.00	11.00	I	0.038	0.072	0.000	1.157	-0.033	0.020	0.019	0.213
11	84.00	12.00	I	0.047	0.072	0.000	1.407	-0.034	0.058	0.035	0.488
I											
12	91.00	13.00	I	0.055	0.081	0.000	1.726	-0.037	0.073	0.044	0.584
13	98.00	14.00	I	0.059	0.094	0.000	1.966	-0.033	0.088	0.052	0.660
14	105.00	15.00	I	0.067	0.120	0.000	2.096	-0.028	0.102	0.061	0.736
15	112.00	16.00	I	0.072	0.224	0.000	2.190	-0.019	0.126	0.076	0.984
16	119.00	17.00	I	0.078	0.328	0.000	2.309	-0.018	0.134	0.086	1.114
I											
17	126.00	18.00	I	0.094	0.477	0.000	2.722	-0.009	0.140	0.100	1.232

Tabelle A18: Stahldehnungen des unteren Podestes von Treppe 2

Treppe 1

oberer Lauf :

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 49	S 50	S 51	S 52	S 53	S 54	S 55	S 56	S 57	S 58	S 59	S 60	S 61
I																
1	21.00	3.00	I	-0.009	-0.005	-0.002	0.013	0.034	0.016	0.028	0.035	0.022	0.035	0.030	0.004	0.016
2	28.00	4.00	I	-0.012	-0.007	-0.003	0.016	0.045	0.020	0.037	0.047	0.028	0.046	0.039	0.005	0.020
3	35.00	5.00	I	-0.015	-0.009	-0.005	0.020	0.058	0.025	0.047	0.059	0.038	0.059	0.050	0.006	0.025
4	42.00	6.00	I	-0.019	-0.011	-0.007	0.023	0.069	0.030	0.058	0.071	0.047	0.069	0.059	0.005	0.029
5	49.00	7.00	I	-0.021	-0.014	-0.009	0.028	0.084	0.036	0.069	0.086	0.057	0.084	0.072	0.008	0.036
I																
6	56.00	8.00	I	-0.024	-0.016	-0.011	0.033	0.101	0.044	0.084	0.104	0.068	0.101	0.084	0.009	0.039
7	56.00	8.00	I	-0.027	-0.016	-0.011	0.035	0.111	0.048	0.092	0.117	0.072	0.113	0.088	0.010	0.038
8	63.00	9.00	I	-0.031	-0.019	-0.014	0.041	0.138	0.061	0.113	0.145	0.086	0.135	0.090	0.014	0.041
9	70.00	10.00	I	-0.033	-0.020	-0.016	0.046	0.171	0.073	0.140	0.186	0.099	0.160	0.564	0.018	0.037
10	77.00	11.00	I	-0.038	-0.022	-0.016	0.055	0.220	0.085	0.179	0.254	0.118	0.198	0.764	0.023	0.028
I																
11	84.00	12.00	I	-0.044	-0.026	-0.019	0.063	0.295	0.088	0.242	0.361	0.140	0.228	0.954	0.028	0.025
12	84.00	12.00	I	-0.044	-0.026	-0.019	0.069	0.350	0.089	0.301	0.436	0.156	0.239	1.089	0.040	0.030
13	91.00	13.00	I	-0.046	-0.027	-0.020	0.082	0.404	0.099	0.356	0.486	0.176	0.266	1.780	0.032	0.016
14	98.00	14.00	I	-0.053	-0.032	-0.028	0.093	0.531	0.108	0.510	0.596	0.219	0.334	1.924	0.041	0.015
15	105.00	15.00	I	-0.058	-0.035	-0.032	0.103	0.656	0.108	0.893	0.711	0.255	0.467	2.118	0.047	-0.002
I																
16	112.00	16.00	I	-0.067	-0.042	-0.040	0.269	1.154	0.295	1.383	1.151	0.582	1.204	2.482	0.213	0.098
17	119.00	17.00	I	-0.073	-0.046	-0.046	0.305	1.223	1.078	1.514	1.230	0.658	1.437	2.686	0.240	0.119
18	119.00	17.00	I	-0.075	-0.046	-0.048	0.326	1.265	1.238	1.581	1.278	0.714	1.539	2.779	0.251	0.130
19	126.00	18.00	I	-0.056	-0.046	-0.075	0.999	1.604	1.643	1.819	1.675	1.133	1.572	3.033	0.267	0.112

Treppe 2

oberer Lauf :

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 49	S 50	S 51	S 52	S 53	S 54	S 55	S 56	S 57	S 58	S 59	S 60	S 61
I																
2	21.00	3.00	I	0.015	0.065	0.051	0.013	0.017	0.007	0.019	0.016	0.019	0.012	0.017	-0.001	0.003
3	28.00	4.00	I	0.020	0.091	0.069	0.017	0.023	0.010	0.026	0.022	0.026	0.016	0.022	-0.001	0.004
4	35.00	5.00	I	0.026	0.114	0.087	0.020	0.029	0.013	0.034	0.029	0.033	0.020	0.028	-0.001	0.005
5	42.00	6.00	I	0.033	0.138	0.104	0.025	0.036	0.016	0.041	0.036	0.041	0.024	0.034	-0.001	0.006
6	49.00	7.00	I	0.039	0.168	0.126	0.028	0.042	0.018	0.050	0.043	0.049	0.028	0.041	-0.002	0.007
I																
7	56.00	8.00	I	0.052	0.213	0.161	0.035	0.050	0.018	0.059	0.049	0.060	0.029	0.049	-0.001	0.008
8	63.00	9.00	I	0.062	0.252	0.192	0.040	0.058	0.020	0.068	0.058	0.071	0.036	0.055	0.000	0.010
9	70.00	10.00	I	0.082	0.330	0.260	0.047	0.065	0.021	0.078	0.063	0.084	0.034	0.172	-0.003	0.008
10	77.00	11.00	I	0.102	0.418	0.336	0.057	0.079	0.028	0.094	0.078	0.100	0.038	0.287	-0.002	0.009
11	84.00	12.00	I	0.140	0.598	0.538	0.066	0.098	0.041	0.113	0.100	0.124	0.042	0.362	0.002	0.008
I																
12	91.00	13.00	I	0.172	0.734	0.749	0.078	0.117	0.049	0.135	0.124	0.150	0.046	0.441	0.004	0.008
13	98.00	14.00	I	0.174	0.967	1.193	0.089	0.155	0.062	0.195	0.188	0.213	0.055	0.579	0.016	0.015
14	105.00	15.00	I	0.195	1.061	1.317	0.099	0.182	0.069	0.248	0.220	0.260	0.056	0.776	0.024	0.021
15	112.00	16.00	I	0.236	1.154	1.437	0.101	0.206	0.075	0.294	0.250	1.031	0.070	0.953	0.048	0.024
16	119.00	17.00	I	0.269	1.246	1.530	0.110	0.241	0.084	0.353	0.290	1.140	0.079	1.077	0.057	0.031
I																
17	126.00	18.00	I	0.276	1.301	1.561	0.116	0.301	0.098	0.620	0.540	1.224	0.081	1.188	0.073	0.048

Tabelle A19: Stahldehnungen des oberen Laufs für beide Versuchskörper

Treppe 1

unterer Lauf :

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	S 62	S 63	S 64	S 65	S 66	S 67	S 68	S 69	S 70	S 71
I													
1	21.00	3.00	I	-0.007	0.000	0.017	0.000	0.023	0.005	0.016	0.039	0.010	0.024
2	28.00	4.00	I	-0.010	-0.001	0.021	-0.002	0.030	0.006	0.020	0.054	0.013	0.033
3	35.00	5.00	I	-0.011	-0.001	0.027	-0.002	0.039	0.010	0.028	0.069	0.018	0.044
4	42.00	6.00	I	-0.013	-0.001	0.033	-0.003	0.046	0.009	0.033	0.082	0.020	0.051
5	49.00	7.00	I	-0.014	-0.001	0.039	-0.003	0.056	0.013	0.042	0.100	0.026	0.062
I													
6	56.00	8.00	I	-0.018	-0.002	0.042	-0.001	0.069	0.020	0.053	0.122	0.033	0.075
7	56.00	8.00	I	-0.020	-0.004	0.041	0.001	0.077	0.030	0.060	0.135	0.036	0.083
8	63.00	9.00	I	-0.027	-0.009	0.032	0.004	0.091	0.041	0.071	0.160	0.043	0.096
9	70.00	10.00	I	-0.027	-0.014	0.124	-0.003	0.105	0.075	0.084	0.192	0.048	0.110
10	77.00	11.00	I	-0.035	-0.018	0.152	0.002	0.130	0.123	0.108	0.239	0.058	0.132
I													
11	84.00	12.00	I	-0.051	-0.023	0.171	0.011	0.148	0.225	0.145	0.294	0.066	0.144
12	84.00	12.00	I	-0.049	-0.018	0.194	0.013	0.160	0.295	0.174	0.337	0.075	0.156
13	91.00	13.00	I	-0.064	-0.030	0.220	0.014	0.177	0.367	0.222	0.449	0.095	0.185
14	98.00	14.00	I	-0.054	-0.014	0.344	0.013	0.216	0.447	0.262	0.549	0.100	0.205
15	105.00	15.00	I	-0.055	-0.015	0.420	0.006	0.300	0.614	0.321	0.734	0.118	0.253
I													
16	112.00	16.00	I	-0.023	0.054	0.597	-0.012	0.471	0.765	0.655	0.948	0.160	0.445
17	119.00	17.00	I	-0.017	0.091	0.853	-0.015	0.563	0.850	0.824	1.052	0.230	0.860
18	119.00	17.00	I	-0.009	0.163	0.927	-0.016	0.596	0.889	0.866	1.092	0.488	1.022
19	126.00	18.00	I	0.038	0.234	1.025	-0.016	0.655	0.939	0.960	1.204	0.733	1.234

Treppe 2

unterer Lauf :

Stahldehnungen in Promille / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	S 62	S 63	S 64	S 65	S 66	S 67	S 68	S 69	S 70	S 71
I													
2	21.00	3.00	I	-0.009	0.004	0.021	-0.001	0.020	0.012	0.017	0.051	0.043	0.037
3	28.00	4.00	I	-0.014	0.004	0.029	-0.003	0.026	0.016	0.022	0.067	0.058	0.051
4	35.00	5.00	I	-0.017	0.005	0.037	-0.004	0.033	0.019	0.028	0.085	0.071	0.064
5	42.00	6.00	I	-0.020	0.006	0.046	-0.005	0.040	0.022	0.034	0.101	0.087	0.079
6	49.00	7.00	I	-0.023	0.007	0.058	-0.005	0.049	0.026	0.042	0.122	0.105	0.095
I													
7	56.00	8.00	I	-0.031	0.007	0.075	-0.005	0.062	0.033	0.052	0.151	0.127	0.114
8	63.00	9.00	I	-0.031	0.011	0.100	-0.003	0.078	0.039	0.061	0.180	0.150	0.135
9	70.00	10.00	I	-0.040	0.012	0.126	-0.003	0.100	0.046	0.076	0.230	0.180	0.163
10	77.00	11.00	I	-0.041	0.018	0.179	-0.004	0.129	0.049	0.103	0.266	0.226	0.216
11	84.00	12.00	I	-0.040	0.046	0.353	-0.001	0.144	0.057	0.151	0.284	0.362	0.406
I													
12	91.00	13.00	I	-0.042	0.062	0.454	-0.004	0.167	0.066	0.195	0.328	0.460	0.549
13	98.00	14.00	I	-0.031	0.160	0.679	-0.009	0.336	0.066	0.359	0.389	0.649	0.833
14	105.00	15.00	I	-0.025	0.257	0.815	-0.015	0.424	0.069	0.443	0.431	0.755	0.989
15	112.00	16.00	I	-0.010	0.399	0.963	-0.021	0.563	0.066	0.622	0.535	0.986	1.460
16	119.00	17.00	I	0.001	0.525	1.079	-0.023	0.646	0.069	0.706	0.647	1.113	1.684
I													
17	126.00	18.00	I	0.022	0.670	1.165	-0.030	0.846	0.067	0.788	0.779	1.188	2.160

Tabelle A20: Stahldehnungen des unteren Laufs für beide Versuchskörper

unteres Podest: oberer

Stahldehnungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 31	S 32	S 33	S 34	S 35	S 36	S 37	S 38	S 40
1	31.50	9.00	I	—	0.370	0.128	0.003	0.413	0.003	0.253	0.001	0.005
2	52.50	15.00	I	—	0.714	0.211	0.010	0.796	0.016	0.492	0.013	0.009
3	66.50	19.00	I	—	0.970	0.260	0.018	1.041	0.024	0.658	0.020	0.014
4	73.50	21.00	I	—	1.114	0.288	0.020	1.166	0.027	0.754	0.024	0.018
5	80.50	23.00	I	—	1.265	0.317	0.026	1.286	0.030	0.859	0.031	0.020
6	87.50	25.00	I	—	1.433	0.378	0.038	1.396	0.032	0.969	0.043	0.020
7	94.50	27.00	I	—	1.642	0.534	0.059	1.511	0.027	1.087	0.041	0.020
8	101.50	29.00	I	—	1.892	0.685	0.100	1.649	0.027	1.203	0.045	0.020
9	108.50	31.00	I	—	2.277	0.943	0.322	1.931	0.029	1.337	0.102	0.070

Stahldehnungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 41	S 42	S 43	S 44	S 45	S 46	S 47	S 48
1	31.50	9.00	I	0.612	0.000	-0.006	0.088	0.055	0.031	0.046	0.427
2	52.50	15.00	I	1.118	0.002	-0.009	0.150	0.080	0.052	0.083	0.667
3	66.50	19.00	I	1.458	0.001	-0.011	0.225	0.099	0.065	0.213	0.816
4	73.50	21.00	I	1.637	0.002	-0.012	0.299	0.111	0.078	0.379	0.889
5	80.50	23.00	I	1.814	0.003	-0.013	0.385	0.123	0.095	0.514	0.971
6	87.50	25.00	I	1.992	0.004	-0.013	0.466	0.141	0.136	0.705	1.061
7	94.50	27.00	I	2.191	0.005	-0.013	0.557	0.167	0.200	0.893	1.214
8	101.50	29.00	I	2.399	0.011	-0.015	0.642	0.393	0.266	1.094	1.341
9	108.50	31.00	I	2.624	0.019	-0.016	0.724	0.887	0.379	1.235	1.429

unterer Lauf :

Stahldehnungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 62	S 63	S 64	S 65	S 66	S 67	S 68	S 69	S 70	S 71
1	31.50	9.00	I	0.100	0.105	0.227	-0.044	0.094	0.154	0.160	0.240	0.095	0.264
2	52.50	15.00	I	0.170	0.171	0.414	-0.063	0.162	0.271	0.300	0.438	0.168	0.478
3	66.50	19.00	I	0.238	0.205	0.547	-0.067	0.223	0.366	0.417	0.596	0.238	0.636
4	73.50	21.00	I	0.281	0.221	0.607	-0.069	0.259	0.428	0.484	0.686	0.282	0.721
5	80.50	23.00	I	0.321	0.236	0.658	-0.069	0.293	0.494	0.551	0.776	0.329	0.805
6	87.50	25.00	I	0.381	0.246	0.718	-0.066	0.340	0.572	0.631	0.877	0.383	0.897
7	94.50	27.00	I	0.505	0.255	0.827	-0.063	0.401	0.623	0.714	0.974	0.449	0.988
8	101.50	29.00	I	0.634	0.272	0.980	-0.060	0.497	0.676	0.815	1.080	0.530	1.108
9	108.50	31.00	I	0.712	0.294	1.169	-0.056	0.589	0.722	0.903	1.170	0.602	1.223

Tabelle A21: Stahldehnungen für Treppe 1 im Bruchlastzyklus 2

unteres Podest:

Stahldehnungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 31	S 32	S 33	S 34	S 35	S 36	S 37	S 38	S 40
2	31.50	9.00	I	0.035	0.379	0.065	0.060	0.068	-0.028	0.287	0.006	-0.037
3	66.50	19.00	I	0.095	1.028	0.167	0.140	0.178	0.014	0.800	0.088	-0.025
4	80.50	23.00	I	0.135	1.313	0.214	0.201	0.276	0.035	1.022	0.128	-0.020
5	94.50	27.00	I	0.201	1.589	0.278	0.326	0.490	0.043	1.249	0.156	-0.011
6	108.50	31.00	I	0.420	1.835	0.389	0.922	1.281	0.053	1.465	0.216	0.068
7	115.50	33.00	I	0.519	1.950	0.471	1.119	1.545	0.048	1.581	0.214	0.097

Stahldehnungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 41	S 42	S 43	S 44	S 45	S 46	S 47	S 48
2	31.50	9.00	I	0.005	0.017	0.000	0.000	0.053	0.020	0.042	0.222
3	66.50	19.00	I	0.027	0.084	0.000	0.000	0.326	0.041	0.256	0.601
4	80.50	23.00	I	0.041	0.120	0.000	0.000	0.495	0.058	0.436	0.798
5	94.50	27.00	I	0.054	0.162	0.000	0.000	0.728	0.077	0.801	1.082
6	108.50	31.00	I	0.068	0.257	0.000	0.000	1.221	0.116	1.865	1.474
7	115.50	33.00	I	0.070	0.296	0.000	0.000	1.567	0.133	2.330	1.733

unterer Lauf :

Stahldehnungen in Promille / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P (KN)	p (KN/M2)	I	S 62	S 63	S 64	S 65	S 66	S 67	S 68	S 69	S 70	S 71
2	31.50	9.00	I	0.068	0.267	0.317	-0.011	0.374	0.000	0.209	0.128	0.486	0.935
3	66.50	19.00	I	0.212	0.349	0.766	0.014	1.001	0.020	0.789	0.501	1.227	2.289
4	80.50	23.00	I	0.498	0.459	0.934	0.014	1.242	0.025	1.058	0.726	1.696	2.853
5	94.50	27.00	I	1.625	0.658	1.162	0.008	1.599	0.026	1.668	1.275	2.567	3.789
6	108.50	31.00	I	2.391	0.900	1.472	0.010	2.275	0.030	2.495	2.128	3.472	5.465
7	115.50	33.00	I	2.844	1.134	1.692	0.002	2.500	0.028	2.796	2.364	8.457	5.703

Tabelle A22: Stahldehnungen für Treppe 2 im Bruchlastzyklus 2

Treppe 1

Vertikalkraefte in KN / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	V 31	V 33	V 41	V 43	V 45	V 47	V 51	V 53	V 61	V 63	V 65	V 67
I															
2	21.00	3.00	I	-0.720	-0.420	-4.260	-0.560	-0.660	-1.530	-0.670	-0.540	-0.830	-1.270	-4.510	-0.600
3	28.00	4.00	I	-0.940	-0.560	-5.600	-0.780	-0.900	-2.070	-0.910	-0.780	-1.170	-1.720	-6.100	-0.830
4	35.00	5.00	I	-1.200	-0.710	-6.940	-1.040	-1.180	-2.580	-1.110	-0.980	-1.480	-2.150	-7.580	-1.030
5	42.00	6.00	I	-1.470	-0.860	-8.270	-1.280	-1.500	-3.170	-1.330	-1.160	-1.850	-2.570	-9.110	-1.220
6	49.00	7.00	I	-1.720	-1.040	-9.510	-1.590	-1.840	-3.730	-1.590	-1.380	-2.240	-2.910	-10.620	-1.480
I															
7	56.00	8.00	I	-1.970	-1.200	-10.600	-2.020	-2.120	-4.240	-1.850	-1.600	-2.500	-3.210	-12.000	-1.790
8	56.00	8.00	I	-2.070	-1.230	-10.360	-2.000	-1.760	-4.050	-1.900	-1.640	-2.220	-3.120	-12.090	-1.840
9	63.00	9.00	I	-2.330	-1.430	-11.440	-2.320	-2.100	-4.550	-2.170	-1.920	-2.350	-3.460	-12.960	-2.490
10	70.00	10.00	I	-2.670	-1.680	-12.610	-2.660	-2.550	-5.000	-2.440	-2.170	-2.570	-3.770	-14.000	-3.150
11	77.00	11.00	I	-3.000	-1.920	-13.570	-2.930	-2.600	-5.240	-2.730	-2.380	-2.520	-3.990	-15.550	-3.670
I															
12	84.00	12.00	I	-3.340	-2.290	-14.330	-3.250	-2.550	-5.500	-2.950	-2.490	-2.870	-4.350	-17.270	-4.240
13	84.00	12.00	I	-3.310	-2.310	-14.490	-3.230	-2.640	-5.500	-2.970	-2.460	-2.700	-4.290	-17.380	-4.280
14	91.00	13.00	I	-3.590	-2.450	-15.700	-3.640	-3.650	-6.030	-3.280	-2.760	-2.910	-4.590	-18.530	-4.750
15	98.00	14.00	I	-3.950	-2.760	-16.620	-3.380	-3.740	-6.230	-3.300	-2.920	-3.610	-5.050	-20.320	-5.450
16	105.00	15.00	I	-4.160	-2.930	-17.720	-3.640	-4.510	-6.590	-3.400	-3.180	-3.930	-5.450	-21.900	-6.240
I															
17	112.00	16.00	I	-4.490	-2.870	-18.770	-3.860	-5.410	-7.110	-3.540	-3.170	-4.180	-5.810	-23.730	-7.120
18	119.00	17.00	I	-4.370	-3.370	-20.260	-4.330	-5.900	-7.480	-3.690	-3.380	-4.320	-6.090	-25.200	-7.990
19	119.00	17.00	I	-4.330	-3.320	-20.280	-4.370	-6.240	-7.480	-3.680	-3.470	-4.300	-6.110	-25.430	-8.270
20	126.00	18.00	I	-4.710	-3.490	-21.580	-4.900	-7.160	-7.910	-3.870	-0.490	-5.080	0.980	-15.300	-0.990

Treppe 2

Vertikalkraefte in KN / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	V 31	V 33	V 41	V 43	V 45	V 47	V 51	V 53	V 61	V 63	V 65	V 67
I															
2	21.00	3.00	I	-0.460	-0.580	-4.560	-0.350	-1.560	-0.130	-0.610	-0.450	-0.590	-1.420	-2.990	-1.410
3	28.00	4.00	I	-0.650	-0.790	-6.190	-0.430	-2.160	-0.150	-0.810	-0.660	-0.830	-1.930	-4.040	-1.820
4	35.00	5.00	I	-0.860	-0.990	-7.780	-0.540	-2.740	-0.210	-0.980	-0.900	-1.040	-2.420	-5.070	-2.240
5	42.00	6.00	I	-1.100	-1.180	-9.410	-0.670	-3.320	-0.330	-1.200	-1.140	-1.340	-2.920	-6.120	-2.630
6	49.00	7.00	I	-1.330	-1.360	-10.940	-0.760	-3.900	-0.410	-1.410	-1.390	-1.560	-3.380	-7.180	-3.010
I															
7	56.00	8.00	I	-1.570	-1.520	-12.760	-0.980	-4.140	-0.470	-1.680	-1.730	-1.540	-3.590	-8.300	-3.350
8	63.00	9.00	I	-1.800	-1.720	-14.150	-1.080	-4.820	-0.590	-1.920	-2.010	-1.800	-3.990	-9.260	-3.750
9	70.00	10.00	I	-2.030	-1.830	-15.920	-1.390	-5.230	-0.610	-2.160	-2.340	-1.740	-4.180	-10.060	-4.190
10	77.00	11.00	I	-2.210	-2.000	-17.280	-1.560	-5.830	-0.670	-2.390	-2.620	-1.930	-4.560	-11.010	-4.540
11	84.00	12.00	I	-2.520	-2.330	-17.500	-1.970	-6.460	-0.890	-2.670	-2.970	-1.980	-4.730	-12.090	-4.930
I															
12	91.00	13.00	I	-2.780	-2.600	-19.100	-2.230	-6.730	-1.010	-2.960	-3.260	-2.000	-5.090	-13.360	-5.320
13	98.00	14.00	I	-3.010	-3.060	-19.860	-2.310	-6.970	-1.120	-3.190	-3.380	-2.210	-5.330	-14.930	-5.440
14	105.00	15.00	I	-3.220	-3.180	-21.130	-2.550	-7.830	-1.290	-3.470	-3.540	-2.360	-5.710	-16.380	-5.400
15	112.00	16.00	I	-3.410	-3.230	-21.850	-2.920	-9.010	-1.510	-3.610	-3.780	-2.770	-5.990	-17.640	-5.560
16	119.00	17.00	I	-3.580	-3.410	-23.170	-3.030	-9.800	-1.660	-3.810	-4.120	-3.020	-6.370	-18.660	-5.760
I															
17	126.00	18.00	I	-3.830	-3.730	-23.670	-3.290	-10.510	-1.620	-3.860	-4.330	-3.370	-6.600	-20.000	-5.910

Tabelle A23: vertikale Auflagerkräfte im Bruchlastzyklus 1

Treppe 1

Vertikalkräfte in KN / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	V 31	V 33	V 41	V 43	V 45	V 47	V 51	V 53	V 61	V 63	V 65	V 67
2	31.50	9.00	I	-1.830	-1.820	-7.870	-1.610	-0.350	-3.800	0.180	-0.060	-0.680	-0.320	-0.100	-0.300
3	52.50	15.00	I	-3.480	-3.430	-12.790	-2.400	-0.580	-5.750	0.400	-0.270	-1.190	-0.460	-0.100	-0.450
4	66.50	19.00	I	-4.720	-4.600	-15.960	-2.890	-0.860	-6.910	0.510	-0.410	-1.480	-0.490	-0.080	-0.510
5	73.50	21.00	I	-5.440	-5.210	-17.570	-3.010	-1.010	-7.530	0.550	-0.450	-1.600	-0.460	-0.040	-0.550
6	80.50	23.00	I	-6.140	-5.790	-19.240	-3.160	-1.140	-8.170	0.590	-0.540	-1.780	-0.420	0.040	-0.510
7	87.50	25.00	I	-7.020	-6.420	-20.670	-3.070	-1.200	-8.800	0.620	-0.630	-1.850	-0.360	0.120	-0.450
8	94.50	27.00	I	-6.580	-7.350	-21.340	-5.270	-1.030	-9.420	0.630	-0.710	-1.910	-0.340	0.220	-0.380
9	101.50	29.00	I	-6.990	-7.910	-22.140	-6.260	-1.250	-9.980	0.630	-0.770	-1.950	-0.320	0.280	-0.340
10	108.50	31.00	I	-8.610	-8.850	-24.000	-4.740	-1.890	-9.930	0.630	-0.860	-1.980	-0.320	0.320	-0.280

Treppe 2

Vertikalkräfte in KN / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	V 31	V 33	V 41	V 43	V 45	V 47	V 51	V 53	V 61	V 63	V 65	V 67
2	31.50	9.00	I	-1.260	-3.350	-9.910	-0.730	-2.170	-0.900	0.260	-0.020	-0.220	-0.720	0.020	-0.450
3	66.50	19.00	I	-3.650	-6.990	-18.810	-1.910	-3.520	-3.080	0.350	-0.080	-0.930	-0.920	0.380	-1.360
4	80.50	23.00	I	-4.530	-8.250	-22.100	-2.340	-4.190	-4.270	0.400	-0.120	-1.270	-1.000	0.570	-1.770
5	94.50	27.00	I	-5.440	-9.300	-25.110	-2.620	-5.040	-5.610	0.440	-0.190	-1.660	-1.080	0.810	-2.140
6	108.50	31.00	I	-7.230	-9.830	-28.170	-2.160	-6.650	-6.770	0.460	-0.310	-2.020	-1.160	1.270	-2.490
7	115.50	33.00	I	-7.490	-10.150	-29.640	-2.200	-7.250	-7.420	0.470	-0.380	-2.200	-1.180	1.570	-2.670

Tabelle A24: vertikale Auflagerkräfte im Bruchlastzyklus 2

Horizontalkraefte in KN / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	H 71	H 73	H 75	H 77	H 81	H 83	H 85	H 87	H 89
I												
2	21.00	3.00	I	0.290	0.620	0.900	0.640	-0.380	1.830	-0.120	0.170	0.000
3	28.00	4.00	I	0.390	0.880	1.200	0.890	-0.520	2.460	-0.260	0.250	0.050
4	35.00	5.00	I	0.460	1.060	1.480	1.100	-0.660	3.060	-0.380	0.300	0.110
5	42.00	6.00	I	0.570	1.290	1.800	1.340	-0.790	3.680	-0.490	0.410	0.200
6	49.00	7.00	I	0.670	1.500	2.080	1.580	-0.960	4.290	-0.690	0.480	0.310
I												
7	56.00	8.00	I	0.700	1.750	2.450	1.960	-1.190	5.010	-0.930	0.620	0.500
8	56.00	8.00	I	0.670	1.880	2.590	2.240	-1.460	5.520	-1.120	0.660	0.640
9	63.00	9.00	I	0.700	2.150	3.110	2.700	-1.760	6.370	-1.350	0.780	0.870
10	70.00	10.00	I	0.680	2.550	4.020	3.280	-2.040	7.520	-1.600	0.770	1.130
11	77.00	11.00	I	0.480	2.880	4.670	4.060	-2.730	8.520	-1.980	0.750	1.400
I												
12	84.00	12.00	I	0.190	3.320	5.400	4.540	-3.320	9.320	-2.560	0.770	1.660
13	84.00	12.00	I	-0.250	3.290	5.640	4.780	-3.920	9.300	-2.710	0.490	1.620
14	91.00	13.00	I	-0.730	3.650	6.410	5.680	-4.250	9.570	-2.980	0.350	1.770
15	98.00	14.00	I	-1.390	3.730	7.310	5.800	-5.220	9.310	-3.780	0.090	1.760
16	105.00	15.00	I	-2.300	4.140	8.220	6.580	-5.870	9.120	-4.430	-0.400	2.000
I												
17	112.00	16.00	I	-4.290	4.710	9.510	7.380	-6.840	8.350	-5.380	-1.160	1.500
18	119.00	17.00	I	-6.330	5.230	10.580	8.240	-8.120	7.700	-6.500	-1.470	1.660
19	119.00	17.00	I	-7.350	5.350	10.940	8.680	-8.660	7.340	-6.940	-1.710	1.690
20	126.00	18.00	I	-9.660	4.850	10.470	4.690	-7.000	4.770	-6.090	-4.350	-0.890

Horizontalkraefte in KN / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	H 71	H 73	H 75	H 77	H 81	H 83	H 85	H 87	H 89
I												
2	31.50	9.00	I	0.310	1.010	4.050	-1.350	-0.230	5.750	-0.490	0.200	-0.460
3	52.50	15.00	I	0.630	1.920	7.360	-2.040	-0.110	10.340	-0.740	0.480	-0.850
4	66.50	19.00	I	0.880	2.690	9.590	-2.360	0.080	13.480	-0.910	0.640	-1.030
5	73.50	21.00	I	0.980	3.140	10.750	-2.510	0.220	14.930	-0.950	0.740	-1.140
6	80.50	23.00	I	1.020	3.590	11.960	-2.680	0.370	16.460	-0.940	0.790	-1.260
I												
7	87.50	25.00	I	1.160	3.990	13.620	-2.770	0.500	18.140	-0.900	0.730	-1.320
8	94.50	27.00	I	1.260	4.330	16.390	-2.810	0.630	20.120	-0.820	0.680	-1.310
9	101.50	29.00	I	1.400	4.780	18.450	-2.890	0.780	22.010	-0.730	0.660	-1.400
10	108.50	31.00	I	1.640	4.980	20.780	-2.960	0.880	23.950	-0.670	0.660	-1.460

Tabelle A25: horizontale Auflagerkräfte von Treppe 1 für beide Bruchlastzyklen

Horizontalkraefte in KN / alle Bauteile belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	H 71	H 73	H 75	H 77	H 83	H 85	H 87	H 89
2	21.00	3.00	I	0.430	0.760	1.150	0.440	2.620	-0.280	0.280	-0.090
3	28.00	4.00	I	0.570	1.040	1.500	0.590	3.580	-0.320	0.420	-0.090
4	35.00	5.00	I	0.710	1.300	1.880	0.710	4.520	-0.390	0.520	-0.100
5	42.00	6.00	I	0.860	1.570	2.300	0.870	5.470	-0.430	0.610	-0.160
6	49.00	7.00	I	0.990	1.830	2.790	1.070	6.510	-0.490	0.730	-0.190
7	56.00	8.00	I	1.200	2.230	3.720	1.730	8.070	-0.530	1.010	-0.260
8	63.00	9.00	I	1.360	2.510	4.340	1.980	9.160	-0.600	1.090	-0.320
9	70.00	10.00	I	1.630	2.970	5.520	2.830	11.130	-0.410	1.400	-0.370
10	77.00	11.00	I	1.740	3.310	6.520	3.320	12.730	-0.240	1.670	-0.290
11	84.00	12.00	I	1.860	3.610	8.530	4.320	15.040	-0.030	2.160	0.020
12	91.00	13.00	I	2.070	4.130	10.000	5.090	17.140	0.150	2.510	0.040
13	98.00	14.00	I	2.240	4.610	11.690	5.980	19.560	0.420	2.970	0.270
14	105.00	15.00	I	2.370	4.990	13.040	6.650	21.790	0.870	3.420	0.420
15	112.00	16.00	I	2.570	5.360	14.730	7.580	24.590	1.350	3.930	0.720
16	119.00	17.00	I	2.730	5.770	16.190	8.190	26.800	1.600	4.290	0.900
17	126.00	18.00	I	2.930	6.280	17.820	9.070	29.370	1.940	4.750	1.150

Horizontalkraefte in KN / nur unterer Lauf und Podest belastet

LF	P(KN)	p(KN/M2)	I	H 71	H 73	H 75	H 77	H 83	H 85	H 87	H 89
2	31.50	9.00	I	0.060	1.080	1.580	-1.580	0.010	-0.980	0.370	-0.150
3	66.50	19.00	I	0.370	2.760	3.220	-2.930	0.020	-1.960	1.000	-0.180
4	80.50	23.00	I	0.550	3.520	4.020	-3.530	0.020	-2.330	1.270	-0.200
5	94.50	27.00	I	0.810	4.370	5.010	-4.210	0.020	-2.650	1.520	-0.290
6	108.50	31.00	I	0.960	5.230	6.400	-4.960	0.010	-3.040	1.770	-0.300
7	115.50	33.00	I	1.130	5.740	7.180	-5.390	0.020	-3.190	1.900	-0.330

Tabelle A26: horizontale Auflagerkräfte von Treppe 2 für beide Bruchlastzyklen

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

"Baukostendämpfung bei Geschoßtreppen"

A N H A N G B

zum

A B S C H L U S S B E R I C H T

Beispiele und Ergänzungen zur Treppenberechnung
nach dem vorläufigen Näherungsverfahren
gemäß Abschnitt 8

Bericht erstattet von
o.Prof. Dr.-Ing.E.h. Dr.-Ing. K. Kordina
Dipl.-Ing. H.-H. Osteroth

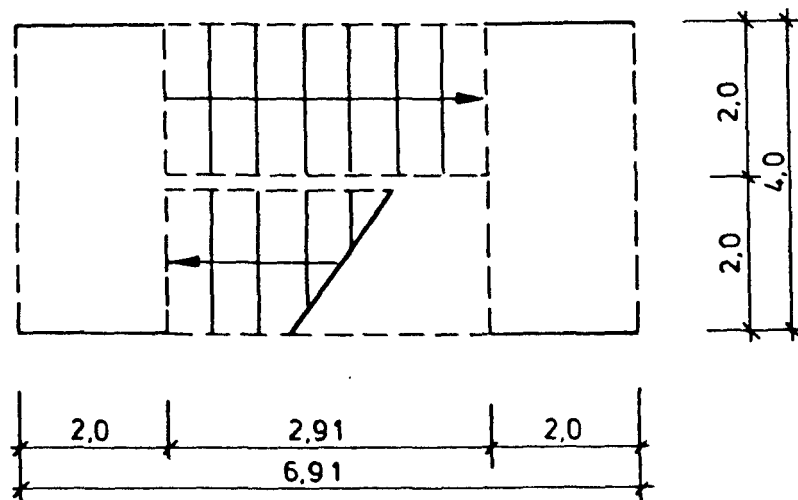
Braunschweig im September 1987

Das Forschungsvorhaben wurde im Auftrage des Bundesministeriums
für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn - Bad Godesberg
durchgeführt. (Az.: B15 - 80 01 85 - 3)

1 Gegenüberstellung verschiedener Näherungsverfahren

Zur Abschätzung der Bewehrungseinsparung, die sich bei Anwendung des in Abschnitt 8 angegebenen Näherungsverfahrens ergibt, wird das unten dargestellte Treppensystem nach diesem Verfahren und den bisher üblichen Näherungsansätzen ohne Faltwerkwirkung berechnet. Zum Vergleich werden auch die Ergebnisse der FE-Berechnung dieses Systems mitgeteilt.

- Systemabmessungen in der Grundrißprojektion

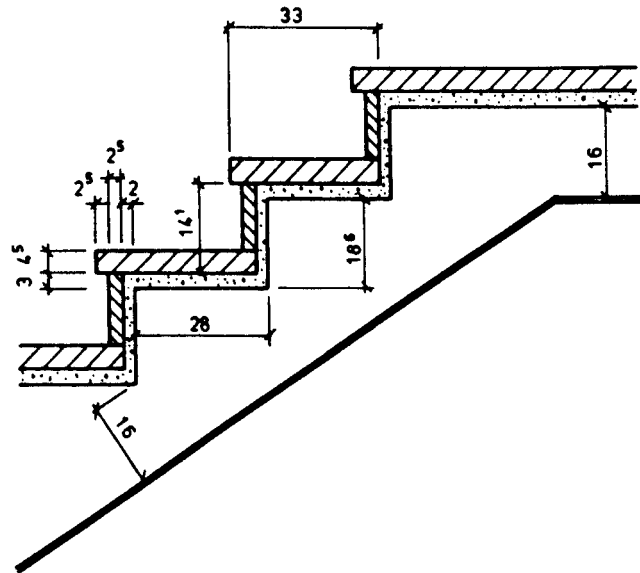


Laufneigung $\alpha = 33,69^\circ$

Plattendicke $d = 16 \text{ cm}$

Die Podeste sind an den Schmalseiten gelenkig aufgelagert.

Mit dem im Bild dargestellten Treppenbelagsaufbau ergibt sich folgende Belastung:



Podestplatte:

$$\begin{aligned}
 &= 0,16 \cdot 25 = 4,00 \text{ kN/m}^2 \\
 &1,5 \text{ cm Putz } 0,015 \cdot 18 = 0,27 \text{ kN/m}^2 \\
 &4,5 \text{ cm Natursteinbelag } 0,045 \cdot 30 = 1,35 \text{ kN/m}^2 \\
 &3,0 \text{ cm Mörtelbett } 0,03 \cdot 21 = 0,63 \text{ kN/m}^2 \\
 &\Delta g_P = 2,25 \text{ kN/m}^2 \\
 &P_P = 5,00 \text{ kN/m}^2 \\
 &q_P = g_P + \Delta g_P + P_P = 11,25 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Treppenlauf:

$$\begin{aligned}
 g_L &= 0,16 \cdot 25 / \cos 33,69 = 4,81 \text{ kN/m}^2 \\
 &\sim 1,5 \text{ cm Putz } 0,015 \cdot 18 = 0,27 \text{ kN/m}^2 \\
 &\text{Betonstufe } \frac{0,186 \cdot 23}{2} = 2,14 \text{ kN/m}^2 \\
 &\text{Mörtel } 0,03 \cdot 21 + \frac{0,02 \cdot 0,186 \cdot 21}{0,28} = 0,91 \text{ kN/m}^2 \\
 &\text{Naturstein } \frac{0,045 \cdot 0,33 \cdot 30}{0,28} + \frac{0,025 \cdot 0,141 \cdot 30}{0,28} = 1,97 \text{ kN/m}^2 \\
 &\Delta g_L = 5,29 \text{ kN/m}^2 \\
 &P_L = 5,00 \text{ kN/m}^2 \\
 &q_L = g_L + \Delta g_L + P_L \approx 15,10 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

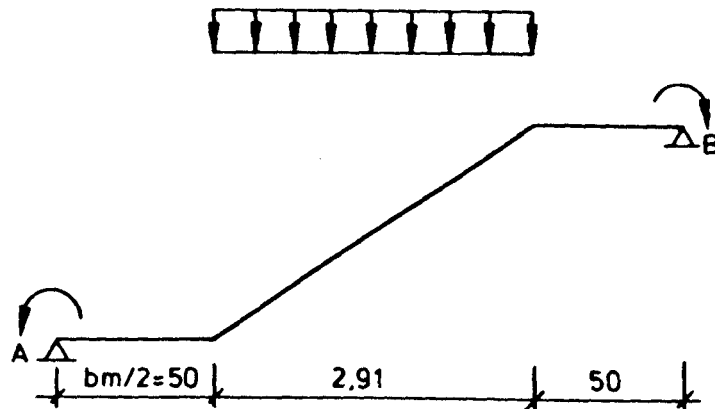
- Belastung

Podestplatte $q_P = 11,2 \text{ kN/m}^2$

Treppenlauf $q_L = 15,1 \text{ kN/m}^2$

1.1 Berechnung nach dem Näherungsverfahren
ohne Faltwerkwirkung

Treppenlauf $q = 15,1 \text{ kN/m}^2$



Schnittgrößen

$$A = B = 15,1 \cdot 2,91 \cdot 0,5 = 21,97 \text{ kN/m}$$

$$\max M_O = 21,97 \cdot 1,955 - 15,1 \cdot \frac{1,455^2}{2} = 26,97 \text{ kNm/m}$$

wegen elastischer Einspannung in die Podestplatten:

$$M_F = |M_A| = |M_B| = 0,8 \cdot 26,97 = 21,58 \text{ kNm/m}$$

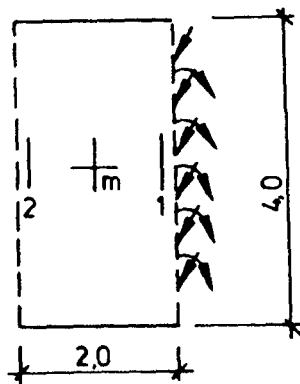
Bemessung B 35, BSt 420/500, $d/h \approx 16/14 \text{ cm}$

$$k_h = \frac{14}{\sqrt{21,58}} = 3,01$$

$$\text{---} \rightarrow \text{erf. as} = 4,5 \cdot \frac{21,58}{14} = 6,94 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\emptyset 10, s = 11 \text{ cm} \hat{=} 7,14 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Podest



$$\varepsilon = \frac{l_y}{l_x} = \frac{2,0}{4,0} = 0,5$$

Belastung: $q_p = 11,2 \text{ kN/m}^2$ (Flächenlast)

$q_R = 21,97 \text{ kN/m}$ (Linienlast)

$m_R = 21,58 \text{ kNm/m}$ (Randmoment)

Schnittgrößen

$$\begin{aligned} m_{x1} &= 11,2 \cdot 4,0^2 / 8 &= 22,44 \text{ kNm/m} \\ &+ 0,32 \cdot 4,0 \cdot 21,97 &= 28,12 \text{ kNm/m} \\ &+ 0,29 \cdot 21,58 &= \underline{6,26 \text{ kNm/m}} \\ &&56,82 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{x2} &= 11,2 \cdot 4,0^2 / 8 &= 22,44 \text{ kNm/m} \\ &+ 0,19 \cdot 4,0 \cdot 21,97 &= 16,7 \text{ kNm/m} \\ &- 0,20 \cdot 21,58 &= \underline{-4,32 \text{ kNm/m}} \\ &&34,82 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{xm} &= 11,2 \cdot 4,0^2 / 8 &= 22,44 \text{ kNm/m} \\ &+ 0,25 \cdot 4,0 \cdot 21,97 &= 21,97 \text{ kNm/m} \\ &- 0,03 \cdot 21,58 &= \underline{-0,65 \text{ kNm/m}} \\ &&43,79 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{ym} &= -0,04 \cdot 4,0 \cdot 21,97 &= -3,52 \text{ kNm/m} \\ &- 0,39 \cdot 21,58 &= \underline{-8,42 \text{ kNm/m}} \\ &&-11,94 \text{ kNm/m} \end{aligned}$$

Bemessung B 35, BSt 420/500, $d/h \approx 16/14$ cm

$$x_1 : k_h = \frac{14}{\sqrt{56,82}} = 1,86 \rightarrow a_s = 4,8 \cdot \frac{56,82}{14} = 19,48 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\emptyset 18, s = 12,5 \text{ cm} \hat{=} 20,36 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$x_m : k_h = \frac{14}{\sqrt{43,79}} = 2,12 \rightarrow a_s = 4,7 \cdot \frac{43,79}{14} = 14,7 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\emptyset 14, s = 10 \text{ cm} \hat{=} 15,39 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$x_2 : k_h = \frac{14}{\sqrt{34,82}} = 2,37 \rightarrow a_s = 4,6 \cdot \frac{34,82}{14} = 11,44 \text{ cm}^2/\text{m}$$

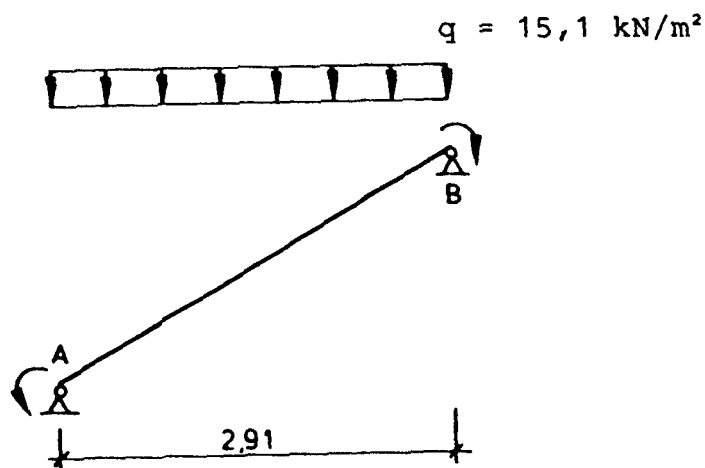
$$\emptyset 14, s = 12,5 \text{ cm} \hat{=} 12,32 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$y_m : k_h = \frac{14}{\sqrt{11,94}} = 4,05 \rightarrow a_s = 4,4 \cdot \frac{11,94}{14} = 3,75 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\emptyset 10, s = 20 \text{ cm} = 3,93 \text{ cm}^2/\text{m}$$

1.2 Berechnung mit den Vereinfachungen des Abschnitts 8

Treppenlauf



Schnittgrößen

$$A = B = 15,1 \cdot 2,91 \cdot 0,5 = 21,97 \text{ kN/m}$$

$$M_F = |M_A| = |M_B| = \frac{15,1 \cdot 2,91^2}{10} = 12,79 \text{ kNm/m}$$

Zugkraft aus der Scheibenbeanspruchung des Laufes gemäß Abschnitt 8.3:

$$Z_L \cong 2,0 \cdot 2,0 \cdot 11,22 + 2,0 \cdot \frac{2,91}{2} \cdot 15,1 = 88,82 \text{ kN} \\ \hat{=} 44,41 \text{ kN/m}$$

Bemessung B 35, BSt 420/500, $d/h \cong 16/14 \text{ cm}$

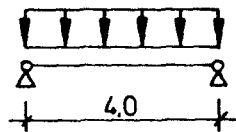
$$M_S = 12,79 - 44,41 \cdot 0,06 = 10,13 \text{ kNm/m}$$

$$k_h = \frac{14}{\sqrt{10,13}} = 4,4$$

$$\rightarrow \text{erfas} = 4,4 \cdot \frac{10,13}{14} + \frac{44,41}{24,0} = 5,03 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\emptyset 10, s = 15 \text{ cm} \hat{=} 5,24 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Podest



Schnittgrößen

$$m = \frac{11,22}{8} \cdot 4,0^2 = 22,4 \text{ kNm/m}$$

Bemessung B 35, BSt 420/500, $d/h \cong 16/14 \text{ cm}$

$$k_h = \frac{14}{\sqrt{22,44}} = 2,96 \rightarrow a_s = 4,5 \cdot \frac{22,44}{14} = 7,21 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\emptyset 10, s = 10 \text{ cm} \hat{=} 7,85 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Ein Vergleich der Näherungsverfahren zeigt, daß sich die Ausnutzung der Faltwerkwirkung bereits bei Ansatz auf der sicheren Seite liegender Vereinfachungen, wie sie in den Abschnitt 8 erläutert wurden, lohnt. Sowohl für den Lauf als auch für das Podest können erhebliche Bewehrungseinsparungen erzielt werden. Zur wirklichkeitsnahen Einstufung und Einordnung der nach Abschnitt 8 errechneten Biegemomente und damit auch als Nachweis, daß diese Werte auf der sicheren Seite liegen, wird hier in Tabelle 1 noch eine Gegenüberstellung dieser Momente mit den aus der Finite-Element-Rechnung ermittelten Werten angefügt. Sie beweist, daß die mit dem Näherungsverfahren nach Abschnitt 8 bestimmten Plattenbiegemomente bei Anwendung der getroffenen Vereinfachungen sicher genug abgeschätzt werden. Die geringfügige Fehleinschätzung der negativen Momente an den Knicklinien ist unbedenklich, da im Feld ausreichend große Reserven für die Umlagerung der Momente bei Rißbildung vorhanden sind.

Ort des Momentenwertes	Biegemomente	
	Näherungsverf. nach Abschn. 8 kNm/m	FEM-Rechnung*) kNm/m
Feldmitte Treppenlauf	12,79	6,45
Knick Lauf unteres Podest	- 12,79	- 6,48
Knick Lauf oberes Podest	- 12,79	-11,05
Feldmitte Podest	22,44	4,62

*) Werte in Elementmitte

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Plattenbiegemomente nach Näherungsberechnung und FEM-Rechnung

2 Ableitung der Beziehung zur Ermittlung der Horizontalkräfte nach /13/ und/26/

2.1 Zweiseitige Podestauflagerung mit recht- winklig zu den Auflagerlinien wirkender Horizontalkraftbeanspruchung

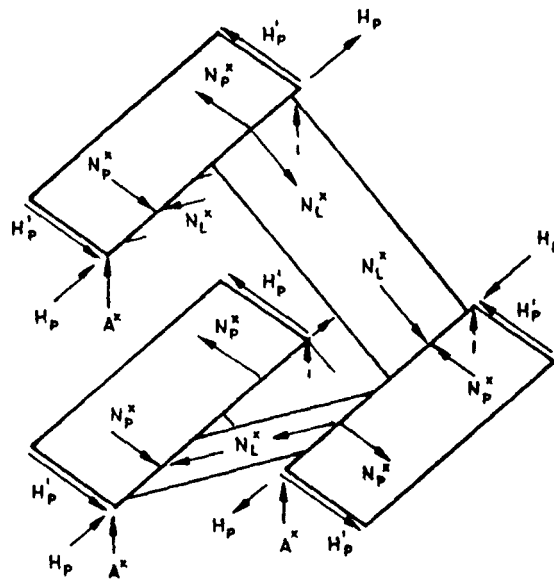


Bild B1: Verteilung der Scheiben- und Auflagerkräfte nach /26/

Für die auf die gesamte Laufbreite bezogenen Scheibenkräfte an den Knicklinien gilt

$$N_P^* = A \cdot b' \cdot \frac{\ell}{h} \quad (\text{B.1})$$

$$N_L^* = A \cdot b' \cdot \frac{1}{\sin \alpha} = A \cdot b' \cdot \frac{\sqrt{\ell^2 + h^2}}{h} \quad (\text{B.2})$$

Hierin bedeuten

A : Auflagerkraft an der Knicklinie

b' : Laufbreite

ℓ : Länge des Laufes in der Grundrißprojektion

h : Höhe eines Laufes

α : Laufneigung

Die Podestplatte wird in ihrer Ebene durch ein Moment aus der Komponente N_P^* beansprucht, das sich wie folgt ergibt:

$$M = (b' + b_A) \cdot A \cdot b' \cdot \frac{\ell}{h} = \lambda \cdot b'^2 \cdot \frac{\ell}{h} + A \cdot b_A \cdot b' \cdot \frac{\ell}{h} \quad (B.3)$$

b_A : Breite des Treppenauges

Zur Aufnahme dieses Momentes ist folgende Horizontalkraft an den Schmalseiten der Podeste erforderlich:

$$H_P' = \frac{(b' + b_A) \cdot A \cdot b' \cdot \ell}{(2b' + b_A) \cdot h} = \frac{(1 + \frac{b_A}{b'}) \cdot A \cdot b' \cdot \ell}{(2 + \frac{b_A}{b'}) \cdot h}$$

mit $\lambda = \frac{b_A}{b'}$ folgt

$$H_P' = \frac{(1 + \lambda)}{(2 + \lambda)} \cdot \frac{\ell}{h} \cdot A \cdot b' \quad (B.4)$$

Mit dieser Horizontalkraft muß noch der horizontale Anteil aus der Kraft N_L^* im Lauf überlagert werden:

$$N_{L,H}^* = A \cdot b' \cdot \frac{\sqrt{\ell^2 + h^2}}{h} \cdot \frac{\ell}{\sqrt{\ell^2 + h^2}} = A \cdot b' \cdot \frac{\ell}{h}$$

Die gesamte Horizontalkraft H_P' an den Schmalseiten der Podeste ergibt sich damit zu:

$$H_P' = \frac{(1 + \lambda)}{(2 + \lambda)} \cdot \frac{\ell}{h} \cdot A \cdot b' - A \cdot b' \cdot \frac{\ell}{h}$$

$$H_P' = \frac{1 + \lambda}{2 + \lambda} \cdot \frac{\ell}{h} \cdot A \cdot b' - \frac{2 + \lambda}{2 + \lambda} \cdot A \cdot b' \cdot \frac{\ell}{h}$$

$$H_P' = \frac{-1}{2 + \lambda} \cdot \ell \cdot A \cdot \frac{b'}{h}$$

$$H_P' = \frac{\ell}{2 + \lambda} \cdot A \cdot \frac{b'}{h} \quad (B.5)$$

Zusätzlich zu diesen Horizontalkräften müssen noch die aus dem Versatzmoment der Kräfte N_L^* entstehenden Horizontalkräfte H_P , die senkrecht zur Auflagerlinie in Verlängerung der Knicklinie wirken, bestimmt werden.

$$\frac{b' \cdot N_{L,H}^*}{\ell} = H_P$$

$$H_P = \frac{a \cdot b'^2 \cdot \ell}{\ell \cdot h}$$

$$H_P = \frac{A \cdot b'^2}{h} \quad (B.6)$$

Die Horizontalkräfte nach Gleichung B.6 bewirken eine Querbeanspruchung für die unter der Auflagerlinie angeordneten Bauteile (Wände, Stützen). Ihre Aufnahme ist daher immer nachzuweisen und durch entsprechende Vorkehrungen bei der konstruktiven Ausbildung des Podestanschlusses zu den angrenzenden Bauteilen sicherzustellen. Besonders vorteilhaft ist dabei die monolithische Verbindung der Podestplatte mit benachbarten Deckenscheiben.

2.2 Dreiseitige Podestauflagerung mit ausschließlich parallel zu den Auflagerlinien wirkender Horizontalkraftbeanspruchung

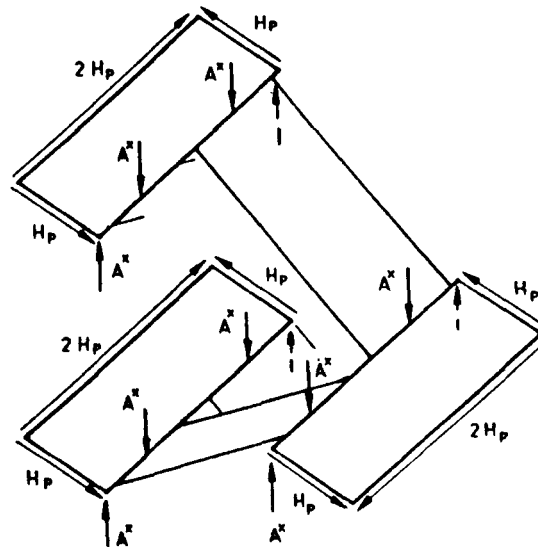


Bild B2: Verteilung der Scheiben- und Auflagerkräfte nach /26/

Die Herleitung der Formeln für die horizontalen Auflagerkräfte erfolgt analog zum vorigen Abschnitt. Die Auflagerung nach Bild B2 ermöglicht im Gegensatz zu den Auflagerbedingungen nach Bild B1 eine Abtragung der Horizontalkraft H_p an der langen Podestquerseite. Durch die Weiterleitung der Horizontalkraft H_p aus der Knicklinie zur langen Podestquerseite entsteht wiederum ein Versatzmoment, so daß die nach Gleichung B.5 errechneten Horizontalkräfte wie folgt ergänzt werden müssen:

Versatzmoment aus der Weiterleitung der Kräfte
 H_p zur langen Podestquerseite

$M = 2 \cdot b \cdot H_p$ $b = \text{Breite der}$
mit Gl. 6.6 folgt Podestschmalseite

$$M = 2 \cdot b \cdot A \cdot \frac{b'^2}{h}$$

Als Horizontalkraft aus diesem Vorsatzmoment
folgt

$$H'_{P,2} = \frac{2b \cdot A \cdot \frac{b'^2}{h}}{2 \cdot b' + b_A} = \frac{2 \cdot b \cdot A \cdot b'}{(2+\lambda)h} \quad (\text{B.7})$$

Die gesamte Horizontalkraft an den Podestschmal-
seiten ergibt sich durch Addition der Gleichun-
gen 6.6 und 6.7 zu

$$H'_P = \frac{\ell}{2+\lambda} A \cdot \frac{b'}{h} + \frac{2b}{2+\lambda} \cdot A \cdot \frac{b'}{h}$$

$$H'_P = \frac{2b+\ell}{2+\lambda} \cdot A \cdot \frac{b'}{h} \quad (\text{B.8})$$

Durch einfache Umformungen und Erweiterungen
kann die Gültigkeit dieser Beziehungen auch
leicht auf Systeme mit geänderten Bedingungen
für die horizontale Auflagerung angepaßt wer-
den.